

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

HENRIQUE DE OLIVEIRA BUENO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO DOWNLINK EM REDE 5G
SEGUINDO MODELO DE CANAL 3GPP RELEASE 15**

UBERLÂNDIA
2019

HENRIQUE DE OLIVEIRA BUENO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UMA TRANSMISSÃO DOWNLINK EM REDE 5G
SEGUINDO MODELO DE CANAL 3GPP RELEASE 15**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do diploma de Engenheiro de Eletrônica e de Telecomunicações.

UBERLÂNDIA
2019

Dedico a minha família e ao meu orientador
Éderson por toda a colaboração e pelo auxílio
durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A rede 5G padronizada, inicialmente, pela *Release 15* lançada pela *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) em setembro de 2018 visa estabelecer um serviço de redes móveis bem superior ao seu padrão anterior, o 4G/LTE. Para cumprir essa tarefa, esta rede oferece taxas de transmissões mais altas, variação do espaçamento entre as subportadoras, maior largura de banda, utilização de outras faixas de frequência, entre outros. A partir disso, este trabalho possui como proposta a avaliação do desempenho da rede 5G em questão através de simulações de uma transmissão *downlink* baseada em especificações da *Release 15* e em um código-exemplo do *software* MATLAB. Para gerar diferentes situações e configurações, realizou-se uma vasta variação de parâmetros, dentre eles a largura de banda do canal, o espaçamento entre as subportadoras, a modulação e o número de antenas. Além disso, uma adaptação do código foi elaborada para permitir uma comparação da variação da distância de transmissão com a vazão do sistema. Com os resultados gerados, foi possível comparar os valores de vazão da rede com os valores teóricos apresentados no documento da organização 3GPP. Tais resultados aproximaram-se bastante da teoria na maioria dos casos, além de mostrar que a taxa de transmissão possui uma dependência muito alta da relação sinal-ruído (SNR) e da largura de banda do canal. Após o fim do trabalho, foi possível notar um eficiente funcionamento da rede 5G, porém com resultados distantes dos esperados para a mesma. Com isso, confirmou-se que a versão inicial da especificação da *Release 15* da 3GPP analisada ainda não provê todos os requisitos estabelecidos como meta no programa IMT-2020. Neste sentido, destaca-se que na versão analisada, em um primeiro momento, buscou integração às redes LTE anteriores (*non-standalone*). Por fim, à medida que as especificações se expandem (*standalone*) e novas *Releases* surgem, certamente, os objetivos das redes 5G serão atendidos.

Palavras-chave: 5G; *Release 15*; Simulação.

ABSTRACT

The 5G network standardized, initially, by Release 15 launched by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) in September 2018 aims to establish a mobile network service far superior to its previous standard, the 4G / LTE. To accomplish this task, this network offers higher transmission rates, variation of the subcarrier spacing, greater bandwidth, use of other frequency bands, among others. From this, this work proposes the evaluation of the performance of the 5G network in question through of simulations of a downlink transmission based on specifications of Release 15 and in an example code of the software MATLAB. To generate different situations and configurations, a wide variation of parameters was made, such as channel bandwidth, subcarrier spacing, modulation and number of antennas. In addition, an adaptation of the code was developed to allow a comparison of the variation of the transmission distance with the throughput of the system. With the results generated, it was possible to compare the network throughput values with the theoretical values presented in the 3GPP organization document. These results were very close to the theory in most cases, besides showing that the transmission rate has a very high dependence on the signal-to-noise ratio and the channel bandwidth. After the end of the work, it was possible to notice an efficient operation of the 5G network, but with results far from those expected for it. Thus, it was confirmed that the initial version of the 3GPP Release 15 specification reviewed still does not provide all of the target requirements as a goal in the IMT-2020 program. In this sense, it is important to highlight that in the analyzed version, at first, it sought integration to the previous LTE networks (non-standalone). Finally, as the specifications expand (standalone) and new Releases come out, certainly the objectives of 5G networks will be met.

Keywords: 5G; Release 15; Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REQUISITOS MÍNIMOS DA REDE 5G.....	16
FIGURA 2 - MODELO DE REDE 5G.....	18
FIGURA 3 - ONDA PORTADORA QPSK.....	20
FIGURA 4 - CONSTELAÇÃO 16-QAM.....	21
FIGURA 5 - ESQUEMA MIMO 2X2.....	22
FIGURA 6 - ESPECTRO DAS SUBPORTADORAS EM DIFERENTES NUMEROLOGIAS.....	24
FIGURA 7 - ESTRUTURA DO SS BLOCK.....	26
FIGURA 8 - VERSÃO NON-STANDALONE DA REDE 5G.....	28
FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.30.....	39
FIGURA 10 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.14-1.....	40
FIGURA 11 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.14-7.....	41
FIGURA 12 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DA LARGURA DE BANDA.....	42
FIGURA 13 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS.....	43
FIGURA 14 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA MIMO.....	45
FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA DE MODULAÇÃO.....	46
FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E DISTÂNCIA DO TERCEIRO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS.....	48
FIGURA 17 - RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E DISTÂNCIA DO TERCEIRO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA MIMO.....	49

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS EM DIFERENTES NUMEROLOGIAS.....	23
TABELA 2 - NÚMERO DE SLOTS DE ACORDO COM O ESQUEMA DE NUMEROLOGIA.....	25
TABELA 3 - BANDAS DE OPERAÇÃO E-UTRA.....	29
TABELA 4 - EIRP MÍNIMA E POTÊNCIA MÁXIMA PARA A CLASSE 1.....	30
TABELA 5 - POTÊNCIAS DE SAÍDA MÁXIMAS DO DISPOSITIVO MÓVEL.....	30
TABELA 6 - POTÊNCIAS DE SAÍDA MÍNIMAS DO DISPOSITIVO MÓVEL.....	31
TABELA 7 - POTÊNCIAS MÍNIMAS DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL.....	32
TABELA 8 - POTÊNCIAS MÁXIMAS DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL.....	32
TABELA 9 - PARÂMETROS COMUNS AOS 3 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO.....	34
TABELA 10 - PARÂMETROS DAS CONFIGURAÇÕES DO PRIMEIRO CENÁRIO.....	36
TABELA 11 - VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS

2.5G	-	Segunda e meia geração
2G	-	Segunda geração
3G	-	Terceira geração
3GPP	-	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	-	Quarta geração
5G	-	Quinta geração
ACS	-	<i>Adjacent Channel Selectivity</i>
ARIB	-	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
ASK	-	<i>Amplitude Shift Keying</i>
ATIS	-	<i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
CCSA	-	<i>China Communications Standards Association</i>
CDL	-	<i>Clustered Delay Line</i>
CP-OFDM	-	<i>Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
D2D	-	<i>Device-to-Device</i>
EIRP	-	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
eNB	-	<i>Evolved Node B</i>
EN-DC	-	<i>E-UTRA NR Dual Connectivity</i>
EPC	-	<i>Evolved Packet Core</i>
ETSI	-	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
F-OFDM	-	<i>Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
gNB	-	<i>Next Generation Node B</i>
GPRS	-	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	-	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HARQ	-	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
ITU-R	-	<i>International Telecommunication Union Radiocommunication Sector</i>
LTE	-	<i>Long Term Evolution</i>
M2Mi	-	<i>Machine-to-Machine Intelligence</i>
MAC	-	<i>Medium Access Control</i>
MCN	-	<i>Multihop Cellular Network</i>
METIS	-	<i>Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society</i>

MIMO	-	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NASA	-	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NR	-	<i>New Radio</i>
NSA	-	<i>Non-standalone</i>
NYU	-	<i>New York University</i>
OFDM	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONU	-	Organização das Nações Unidas
OSI	-	<i>Open System Interconnection</i>
PBCH	-	<i>Physical Broadcast Channel</i>
PDSCH	-	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
ProSe	-	<i>Proximity Services</i>
PSK	-	<i>Phase Shift Keying</i>
PSS	-	<i>Primary Synchronization Signal</i>
QAM	-	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	-	Qualidade de serviço
QPSK	-	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RB	-	<i>Resource Block</i>
RRC	-	<i>Radio Resource Control</i>
SNR	-	Relação sinal-ruído
SSS	-	<i>Secondary Synchronization Signal</i>
TBS	-	<i>Transport Block Size</i>
TCR	-	<i>Target Code Rate</i>
TSDSI	-	<i>Telecommunications Standards Development Society</i>
TTA	-	<i>Telecommunications Technology Association</i>
TTC	-	<i>Telecommunication Technology Committee</i>
UE	-	<i>User Equipment</i>
UKRPIF	-	Fundo de investimento em parceria de pesquisa do Reino Unido
UMa	-	<i>Urban Macro area</i>
UMTS	-	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
W-OFDM	-	<i>Wide-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 A REDE 5G	14
2.1 HISTÓRIA	14
2.2 REQUISITOS MÍNIMOS DA REDE 5G	15
2.3 NOVAS TECNOLOGIAS A SEREM IMPLEMENTADAS	17
2.4 MODELO DE REDE	18
2.5 ASPECTOS DE TRANSMISSÃO	19
2.5.1 Técnicas de modulação.....	19
2.5.1.1 QPSK	19
2.5.1.2 QAM	20
2.5.2 <i>Multiple Input Multiple Output</i> (MIMO).....	22
2.5.3 Espaçamento entre subportadoras	23
2.5.4 Outros parâmetros	25
2.5.4.1 Estrutura de bloco	25
3 A RELEASE 15.....	27
3.2 BANDAS DE OPERAÇÃO	28
3.3 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL	30
3.4 POTÊNCIA DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL	31
3.5 VALORES DE REFERÊNCIA DE VAZÃO DA REDE 5G.....	33
4 SIMULAÇÃO DE UMA TRANSMISSÃO DOWNLINK	34
4.1 MODELAGEM DA SIMULAÇÃO	34
4.1.1 Canal.....	34
4.2 PRIMEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	35
4.3 SEGUNDO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	37
4.4 TERCEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO.....	38
5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	39

5.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO CENÁRIO	39
5.2 RESULTADOS DO SEGUNDO CENÁRIO	41
5.2.1 Relação entre vazão e SNR com variação da largura de banda	42
5.2.2 Relação entre vazão e SNR com variação do espaçamento entre subportadoras	43
5.2.3 Relação entre vazão e SNR com variação do número de antenas	44
5.2.4 Relação entre vazão e SNR com variação do esquema de modulação	46
5.3 RESULTADOS DO TERCEIRO CENÁRIO	47
5.4 CONCLUSÃO DOS RESULTADOS	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICE 1 – CÓDIGO DO CÁLCULO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO	56

1 INTRODUÇÃO

A rede móvel se tornou uma das áreas mais estudadas e discutidas no ramo das telecomunicações nos tempos atuais, pelo fato dela possibilitar taxas de transmissão cada vez mais elevadas, disponibilidade ao usuário e, principalmente, oferecer alta mobilidade. Tal característica aumenta a possibilidade de aplicações deste tipo de rede e a preferência da mesma em relação aos outros serviços de conexão.

Por conseguinte, devido ao uso intenso da conectividade móvel, há sempre uma evolução em sua tecnologia, com várias empresas incentivando financeiramente pesquisas e estudos sobre o tema. Com o intuito de obter essa evolução, a rede 5G está cada vez mais perto de entrar em atividade, tendo como 2020 o seu ano de início de operação.

Desde então, diversas iniciativas vêm sendo tomadas por empresas e organizações de diversos países com a finalidade de gerar novas tecnologias para assim elaborar padrões para o 5G. Com isso, diversos requisitos foram estabelecidos para a rede em questão, dentre eles: latência no ar do usuário de 1 ms, capacidade de 10^6 conexões simultâneas por quilômetro quadrado, mobilidade de 300 a 500 km/h, eficiência espectral de 10 bps/Hz e apresentar em relação ao 4G uma eficiência 50 vezes maior (custo de energia por *bit* transmitido) e uma taxa de transmissão 10 a 100 vezes maior. (FEI HU, 2016).

Até a data da realização deste trabalho, o documento mais completo que melhor padroniza o 5G é a *release* 15, produzido pela organização 3GPP em setembro de 2018. Este documento fornece todos os detalhes e características da nova rede móvel, como por exemplo, os requisitos mínimos de transmissão e recepção, descrição das antenas utilizadas e também o conteúdo teórico já desenvolvido. Além disso, também são fornecidos inúmeros resultados de testes de transmissões realizados com diversos padrões de configuração, possibilitando assim, uma base de comparação para a realização deste trabalho.

Para estudar a rede em questão, observou-se, com o auxílio dos documentos disponíveis, que a vazão é uma excelente medida para análise de desempenho, uma vez que consegue traduzir a qualidade de transmissão e reflete diretamente as variações de características do canal que se deseja realizar. Além disso, este é o

elemento mais citado na *release 15*, o que possibilita uma melhor comparação de resultados com a teoria.

Assim, o trabalho possui como objetivo analisar o desempenho de uma transmissão *downlink* na rede 5G especificada na Release 15 em diferentes configurações para observar o impacto de cada parâmetro na mesma, buscando também comprovar seu desempenho e sustentar ainda mais a sua implementação no futuro. Com o intuito de realizar tais objetivos, utilizando como base um código exemplo do *software* MATLAB, foram realizadas simulações que avaliaram a alteração da vazão em detrimento à variação de outros parâmetros do sistema, ou seja, em diversas situações. Os parâmetros escolhidos para serem analisados juntamente com os seus respectivos impactos na rede foram a largura de banda, o espaçamento entre as subportadoras, a modulação, o número de antenas e a distância entre o usuário e a estação base. Com isso, foi possível realizar um teste de desempenho do 5G, observando o comportamento do sistema sob diferentes condições.

O sucessor da rede 4G/LTE continua sendo bastante estudado e ainda não foi inserido no mercado para uso geral, tendo uma previsão de finalização em 2020. Devido a isso, qualquer pesquisa sobre o desempenho do 5G é bem aceita, pois cada uma delas valida ainda mais a sua implementação e confirma toda a teoria sobre o assunto disponível na literatura, assim justificando a realização deste estudo.

Ao finalizar este trabalho, foi possível notar que a simulação da rede seguindo a *Release 15* resultou em valores de vazão consideráveis, porém bem distantes dos valores almejados para as redes 5G. Uma das razões é a rede analisada ser *non-standalone*, ou seja, uma rede que utiliza como base a estrutura do 4G/LTE. Além disso, percebeu-se uma dependência muito grande da transmissão em relação a SNR e à largura de banda, mostrando que estes parâmetros são essenciais para o desempenho apropriado da rede. Já as outras variáveis possuem como função apenas melhorar a qualidade da mesma ao aumentar a vazão do sistema e permitir que distâncias maiores entre o usuário e a estação base sejam assumidas.

2 A REDE 5G

Neste capítulo realiza-se uma breve apresentação da rede 5G, iniciando com um breve resumo sobre sua história, seguido de seus requisitos mínimos, novas tecnologias a serem implementadas, modelo de rede, bem como os seus aspectos de transmissão.

O capítulo possui como foco descrever os principais elementos envolvidos considerados importantes para a fundamentação do presente trabalho.

2.1 HISTÓRIA

O desenvolvimento do 5G, como a maioria das outras redes, iniciou-se através de projetos e pesquisas financiados por empresas e/ou governos. Antes mesmo do estabelecimento pleno do 4G, os estudos sobre a nova rede já foram iniciados, tendo como primeiro passo a realização de uma parceria da NASA com a empresa M2Mi (*Machine-to-Machine Intelligence*) que visava a produção de tecnologias de comunicação 5G, com foco na aplicação das mesmas em satélites de porte pequeno, feita em 2008. No mesmo ano, a Coreia do Sul iniciou um programa com o intuito de dar início aos estudos sobre a nova rede móvel, denominado de “*5G Mobile communication systems based on beam-division multiple access and relays with group cooperation*”.

Em 2012, diversas outras iniciativas foram tomadas a respeito do 5G, sendo a primeira delas realizada pela universidade de Nova York, fundando uma pesquisa multidisciplinar denominada de “*NYU WIRELESS*”, com o intuito de conduzir o pioneirismo das pesquisas sobre o tema. Logo a seguir, na Europa um grande investimento foi feito pelo Fundo de Investimento em Parceria de Pesquisa do Reino Unido (UKRPIF) e por um conjunto de empresas do ramo de telecomunicações (Huawei, Samsung, Telefonica Europe, entre outras), de um valor de 35 milhões de euros para a Universidade de Surrey. Esta ação teve como objetivo a criação de um novo centro de pesquisa 5G com instalações de testes para o desenvolvimento do novo padrão móvel. Um pouco menos de um mês depois, no mesmo ano, o projeto europeu “*Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society*” (METIS) se iniciou com intuito principal de desenvolver a definição do 5G, sendo este o primeiro programa a construir um leve consenso global

sobre o objeto de estudo, tendo estudos abordados por organizações reguladoras, como por exemplo a ITU-R. Poucos dias depois, o projeto “iJOIN EU” foi lançado, focando seus esforços na tecnologia de células pequenas (*small cells*), fator este considerado uma das inovações trazidas pelo 5G, permitindo assim se realizar transmissões com frequências mais altas.

No ano de 2013, os órgãos responsáveis pelas padronizações começaram a participar do desenvolvimento da nova geração de rede móvel. Em fevereiro, a *International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector* (ITU-R) deu início a 2 estudos focados nas tendências tecnológicas para as telecomunicações móveis terrestres. Porém, o campo privado deu continuidade ao desenvolvimento do 5G, como por exemplo, o sistema criado pela empresa Samsung capaz de transmitir dezenas de *Gbits* por segundo e o investimento da companhia Huawei de 600 milhões de dólares em pesquisas focadas na velocidade de transmissão oferecida pela rede 5G.

Ao longo dos anos seguintes, inúmeros programas realizados por empresas, governos e organizações foram promovidos, produzindo assim uma grande quantidade de conteúdo de pesquisa sobre a rede em questão (FCC, 2019). Com isso, já foi possível estabelecer um padrão que consegue englobar os resultados dessas várias pesquisas, padrão este que representa um consenso global pela maioria dos profissionais que estão envolvidos no projeto de desenvolvimento do 5G. O mesmo foi criado em 2018 pela organização 3GPP, composta por um conjunto de 7 organizações internacionais de telecomunicações, e foi denominado de *Release 15*. Tal documento padroniza a rede 5G nas suas diversas características (aspectos de transmissão e recepção, frequências utilizadas, níveis de potências) e será apresentado neste trabalho no capítulo 3.

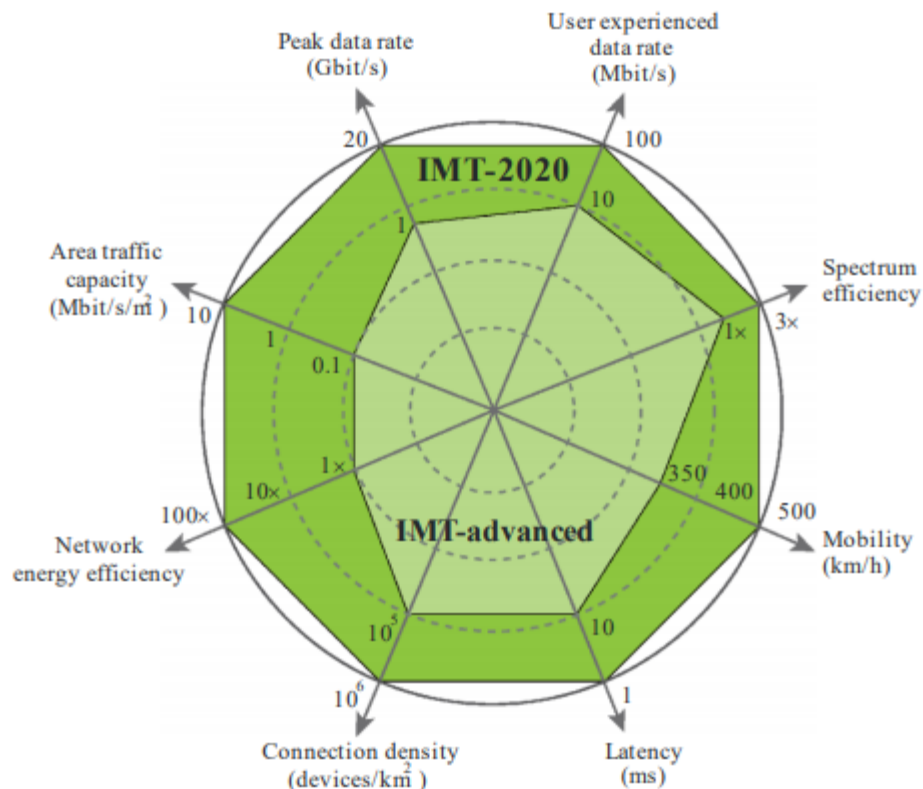
2.2 REQUISITOS MÍNIMOS DA REDE 5G

O 5G vem sendo estudado por diversas frentes de diferentes lugares do mundo, e por isso os resultados obtidos são bem variados. Para resolver isto, estabeleceu-se requisitos mínimos de operação da rede 5G, fazendo com que as diferentes pesquisas tivessem pelo menos um objetivo final em comum.

O órgão que melhor conseguiu padronizar as exigências mínimas da nova geração da rede móvel foi a ITU-R, o setor da agência da ONU especializada em

tecnologias de radiocomunicações. Este feito foi realizado através da criação do programa “IMT-2020”, visando o estabelecimento de um padrão responsável por sustentar as próximas gerações de conectividade de banda larga móvel. Com isso, os requisitos do 5G foram definidos, sendo eles indicados na FIGURA 1.

FIGURA 1 – REQUISITOS MÍNIMOS DA REDE 5G



FONTE: ITU-R M.2083-0 (2015, p.14).

Como mostra a figura presente na recomendação ITU-R M.2083-0, a qual faz parte do programa IMT-2020, as exigências são:

- Pico de taxa de dados de 20 Gbps;
- Taxa mínima para o usuário de 100 Mbps;
- Eficiência espectral 3 vezes maior do que a oferecida pelo 4G;
- Mobilidade do usuário de 500 km/h;
- Latência de 1 ms;
- Densidade de conexão de 10⁶ dispositivos por quilômetro quadrado;
- Eficiência de energia de rede 100 vezes maior do que a oferecida pelo 4G;
- Capacidade de tráfego de 10 Mbps/m².

2.3 NOVAS TECNOLOGIAS A SEREM IMPLEMENTADAS

Como pode-se observar, o 5G possui requisitos bastante exigentes a serem cumpridos. Para isso, diversas tecnologias ainda não aplicadas nas redes móveis vêm sendo desenvolvidas com o intuito de cumprir todas as exigências impostas.

Uma delas é arquitetura centrada em dispositivos, ao contrário das redes de celulares tradicionais que possuem o seu sistema centralizado na célula. Esta nova configuração provê comunicações entre elementos da rede visando evitar transmissões envolvendo longas distâncias e sem visada direta para diminuir, principalmente, a perda por distância, realizando isto com o auxílio das aplicações *Device-to-Device* (D2D) e a *Multihop Cellular Network* (MCN). Esta última técnica consiste em permitir que o nó de origem possa alcançar seu remetente através de 2 ou mais *links* de comunicação, em que cada nó intermediário, representado por outros dispositivos, desempenha o papel de estação de retransmissão. (SHARMA, 2010).

Outra tecnologia proposta é a utilização da banda das ondas milimétricas para transmissão de sinais 5G, faixa correspondente aos 30 GHz até os 300 GHz. Pelo fato desta faixa possuir frequências bem altas, não haveria quase nenhuma interferência na transmissão do seu sinal, cenário bem oposto às faixas de frequência atualmente utilizadas pelo 4G/LTE. Aplicando esta tecnologia seria possível dividir os conteúdos a serem transmitidos pela rede em diferentes faixas no espectro, como já proposto por alguns estudiosos, propagar a informação de controle através frequências de micro-ondas pelos nós de alta potência e propagar o *payload* (informação) através de ondas milimétricas pelos nós de baixa potência. Um dos maiores desafios de colocar em prática todas essas soluções é a alta atenuação do sinal presente nesta faixa de operação, uma vez que a perda em função do caminho é proporcional ao aumento da frequência.

O número de antenas presentes tanto na estação-base quanto nos receptores também é um elemento a ser modificado para se alcançar os requisitos da rede 5G. Para isso, utiliza-se a técnica conhecida como “*Massive MIMO*”, tendo como característica principal possuir “as antenas na estação-base bem maiores em número do que os dispositivos conectados por fonte de sinal” (FEI HU, 2016, p.14). Tal técnica pode ser implementada com uma potência baixa para cada antena e cada uma delas operando de um modo semi-independente, assim diminuindo o custo do sistema.

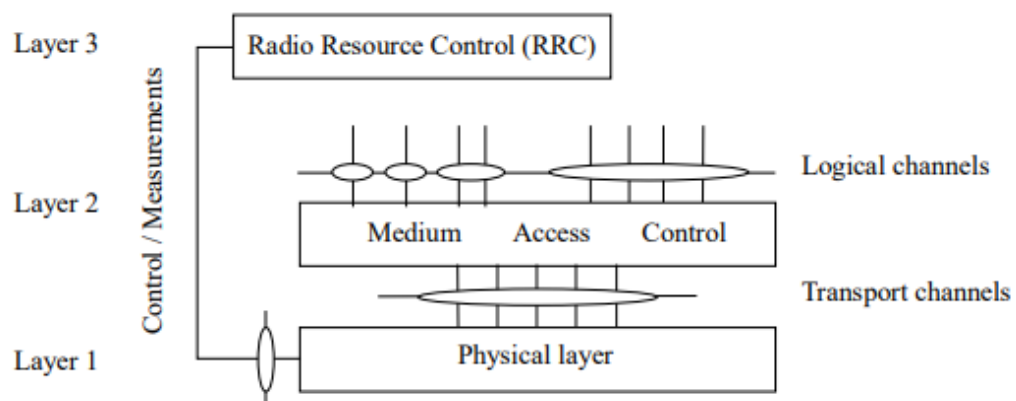
Porém, alguns empecilhos ainda limitam a escalabilidade desta prática, sendo o principal deles a quantidade limitada de usuários por célula. Devido ao movimento do usuário, há uma necessidade de reserva de canais para evitar uma perda total de sinal, impedindo um aumento significativo de usuários por célula, assim não tornando o *Massive MIMO* tão impactante. (FEI HU, 2016, p.14).

2.4 MODELO DE REDE

Igualmente a todas as outras redes existentes, a estrutura de operação do 5G é organizada por um modelo específico. A nova geração das redes móveis tem a sua estrutura organizada por um modelo baseado em camadas que possui algumas semelhanças com o padrão OSI.

No modelo OSI, a rede é dividida em 7 camadas, sendo elas a camada física, de enlace, de rede, de transporte, de sessão, de apresentação e de aplicação. As camadas do modelo utilizado pelas redes 5G possuem uma estrutura conforme ilustrado na FIGURA 2.

FIGURA 2 – MODELO DE REDE 5G



FONTE: TS V5G.201 V1.0 (2016, p. 6).

A primeira camada do novo modelo é denominada como camada física e representa o item de mesmo nome do modelo OSI, possuindo as funções de detecção de erro, codificação, execução de modulação, entre outras. (TS V5G.201 V1.0, 2016).

A segunda camada do novo modelo é denominada como camada MAC e representa a camada de enlace do modelo OSI. A mesma é responsável por várias funções, como a transferência de dados, alocação de recursos da rede, priorização

de canal lógico e a multiplexação e demultiplexação dos sinais. (3GPP TS 38.321, 2018).

A terceira camada no novo modelo é denominada como camada RRC e não possui um elemento que a represente totalmente no modelo OSI. As principais funções estabelecidas por este item são a realização do *broadcast* de informações do sistema, paginação, controle da segurança da rede, alocação e configuração dos blocos de recursos de dados e controle da qualidade de serviço (QoS). (3GPP TS 38.331, 2018).

2.5 ASPECTOS DE TRANSMISSÃO

Diversos parâmetros são responsáveis por caracterizar a rede 5G e seu desempenho, dentre eles a técnica de modulação, o esquema de múltiplas antenas (MIMO), o espaçamento entre as subportadoras, entre outros.

2.5.1 Técnicas de modulação

Este fator é responsável por permitir a transmissão do sinal pelo meio físico (ar), alterando a onda para uma frequência propícia de propagação. Além disso, a seleção do esquema de modulação apropriado permite que a transmissão seja feita com uma taxa de erros adequada e alta eficiência, o que consequentemente aumenta a vazão do sistema. Por fim, mesmo alterando o sinal original, é possível obter exatamente a informação de origem na recepção.

Há inúmeras técnicas de modulação já desenvolvidas, cada uma com seus benefícios e desvantagens. Dentre elas, as que melhor se enquadram no cenário 5G oferecendo um bom desempenho são as modulações *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) e *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

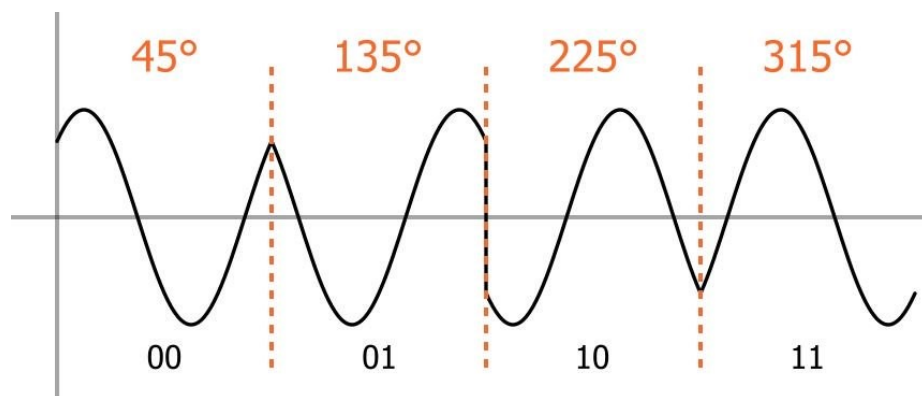
2.5.1.1 QPSK

A modulação QPSK é uma derivação da técnica *Phase Shift Keying* (PSK). Nesta, o sinal digital é modulado através da variação de fase da onda portadora. Quando uma mudança de valor de bit ocorre (de 1 para 0, por exemplo), há uma variação na fase da portadora indicando esta alteração. Este esquema oferece a

utilização de apenas 2 símbolos, ou seja, cada símbolo composto por apenas 1 bit e, consequentemente, permitindo apenas um valor de variação de fase (180°).

Já na técnica QPSK são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para indicar as alterações de símbolos do sinal digital de informação. Com isso, a fase em questão pode assumir diversos valores pertencentes em diferentes quadrantes, permitindo a utilização de mais bits para a representação dos símbolos. Por exemplo, na modulação com 4 símbolos possíveis é possível variar a fase da portadora em 4 valores diferentes, cada uma delas representando uma sequência de 2 bits de dados (00, 01, 10 e 11) (FIGURA 3). O QPSK, assim como o PSK, apresenta uma ótima imunidade a ruídos e possibilita transmissões com uma vazão considerável.

FIGURA 3 – ONDA PORTADORA QPSK



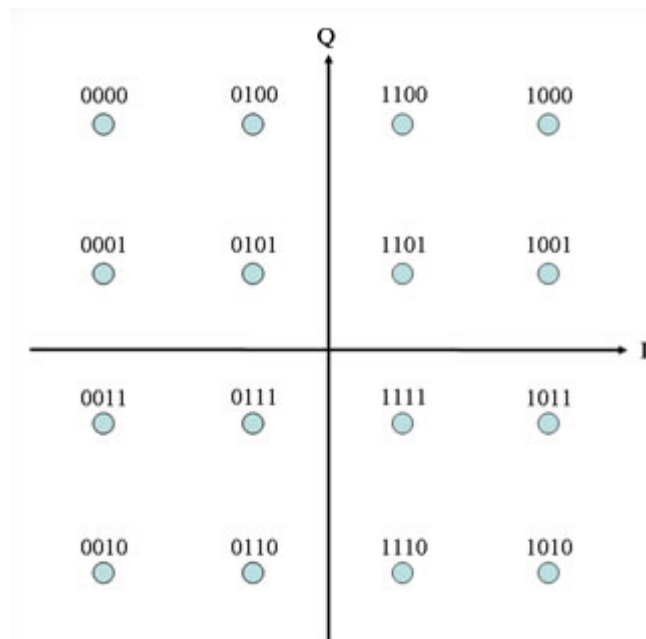
FONTE: UNDERSTANDING (2019).

2.5.1.2 QAM

Esta modulação é uma combinação das técnicas *Amplitude Shift Keying* (ASK) e PSK, ou seja, há variações tanto na amplitude quanto na fase da onda portadora para representar a mudança de símbolo de informação. A portadora utilizada é formada pela soma de duas senoides de mesma frequência, uma delas multiplicada pela amplitude Q determinada pela informação e a outra multiplicada pela amplitude I, também determinada pela informação, e defasada de 90° , representada pela equação $S(t) = Q \sin(\omega t) + I \cos(\omega t)$. O resultado disto é representado por uma constelação de pontos no espaço Q e I que indicam os símbolos de dados digitais.

O QAM é uma técnica escalável devido aos inúmeros valores que as amplitudes Q e I podem assumir, sendo eles sempre uma potência de 2. Por exemplo, a modulação 16-QAM indica que cada símbolo é composto por 4 bits e que cada um deles é composto por uma das 16 combinações possíveis de amplitudes I e Q, gerando uma portadora $S(t)$ correspondente. A FIGURA 4 mostra a representação da constelação de pontos deste modelo de técnica.

FIGURA 4 – CONSTELAÇÃO 16-QAM



FONTE: LAB (2019).

Pelo fator escalável, o QAM consegue atingir taxas de transmissão maiores que as técnicas descritas anteriormente. Além disso, esse aumento da taxa de transmissão é observado com mais intensidade à medida que a dimensão da constelação aumenta, uma vez que a quantidade de bits por símbolo também se torna maior. Porém, quanto maior a constelação, mais perto os símbolos estão um dos outros no plano Q e I, representando uma maior interferência entre eles e consequentemente aumentando a taxa de erro de bit da transmissão.

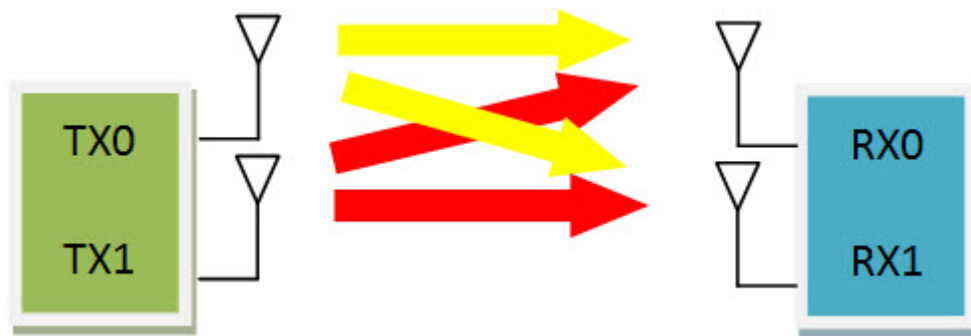
Um fator minimizador das desvantagens do acréscimo do número de constelações é o aumento da relação sinal-ruído. Com uma taxa de erro de bit elevada, é necessária uma potência de transmissão mais alta para amenizar este

problema, o que consequentemente gera uma SNR maior e um impacto menor do ruído sobre o sinal, evitando erros de *bit*.

2.5.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

A técnica de múltiplas antenas é utilizada em diversas redes móveis, pelo fato de oferecer uma excelente performance de vazão, eficiência de espectro e um ótimo custo-benefício. Ela consiste em um esquema de múltiplas entradas e múltiplas saídas de sinal, estabelecido de uma forma organizada para ser possível recuperar a informação original corretamente (FIGURA 5).

FIGURA 5 – ESQUEMA MIMO 2X2



FONTE: REDE (2019).

Em uma comunicação MIMO, na configuração de multiplexação espacial, o fluxo de bits é dividido pela quantidade de antenas transmissoras e cada segmento (*stream*) é transmitido por uma delas, sendo assim possível transmitir muito mais dados em uma quantidade menor de tempo. Cada *stream* possui bits sinalizadores para indicarem qual parte do dado ele representa, permitindo que na recepção o fluxo de informação seja reestruturado na ordem correta, em cada uma das antenas receptoras.

Já na configuração de codificação espaço-tempo, o sistema de múltiplas antenas fornece ganho de potência do sinal para combater a perda por multi-percurso. Isto é feito transmitindo simultaneamente os mesmos dados em todas as antenas, porém codificados de formas diferentes. Todos eles são recebidos em cada antena receptora, assim aumentando a potência total do sinal enviado.

Logicamente, quanto maior o número de antenas presentes, maior a complexidade do sistema e maior será a taxa de transmissão ou mais potencializado o sinal será. Por exemplo, para transmissões 5G pode-se utilizar sistemas 2x2, 4x4, entre outros. Maiores detalhes sobre os sistemas MIMO podem ser encontrados na referência (COMMUNICATIONS, 2019).

2.5.3 Espaçamento entre subportadoras

A técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) implementada tanto no 4G quanto no 5G permite uma transmissão simultânea de diversos sinais através de uma divisão do espectro em portadoras paralelas ortogonais entre si, denominadas subportadoras. Esses elementos necessitam estar minimamente separados para evitar interferência entre eles mesmos, justificando assim a presença do espaçamento entre subportadoras.

Na rede 4G este parâmetro possui um valor fixo de 15 KHz, obtendo uma eficiência espectral considerável e evitando a interferência entre os sinais. Já para o 5G, propõe-se um espaçamento entre subportadoras variável, podendo alcançar valores bem altos em relação à versão anterior, por exemplo 240 KHz. (FRAME, 2019). Com isso, a sensibilidade do sinal transmitido em relação ao ruído de fase se torna bem menor, aumentando a vazão do sistema. (JEON, 2018). Consequentemente, a banda necessária para transmissão também aumenta, causando uma diminuição da eficiência espectral. Mas o 5G possui a proposta de futuramente utilizar bandas muito pouco exploradas pelas telecomunicações (por exemplo, as ondas milimétricas), possibilitando utilizar maiores faixas de frequência sem maiores problemas.

Para oferecer o serviço de espaçamento variável, a rede 5G conta com a técnica conhecida como “numerologia”, a qual consiste em definir o tamanho deste espaço através de um coeficiente μ . Esta variável, através da relação $2^\mu * 15 \text{ KHz}$ indica o tamanho da distância entre as subportadoras no espectro (TABELA 1).

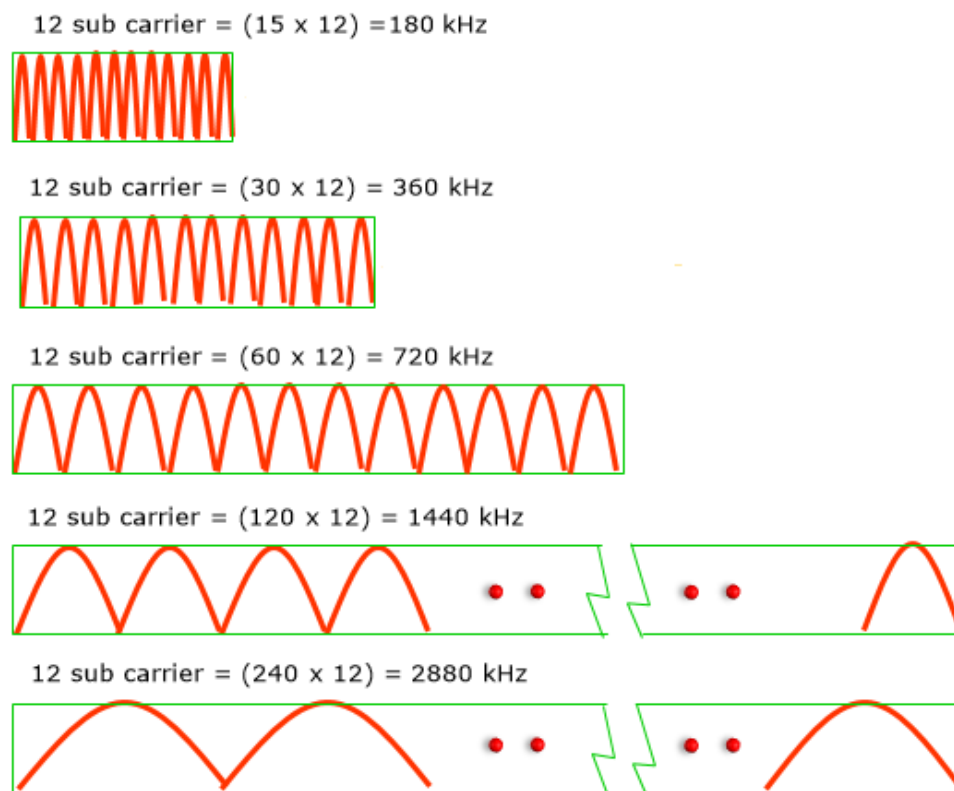
TABELA 1 – ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS EM DIFERENTES NUMEROLOGIAS

μ	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 [\text{kHz}]$	Cyclic prefix
0	15	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal

FONTE: FRAME (2019).

A queda de eficiência espectral devido ao aumento do espaçamento pode ser exemplificada por um conjunto de 12 subportadoras configuradas nas várias numerologias possíveis (FIGURA 6).

FIGURA 6 – ESPECTRO DAS SUBPORTADORAS EM DIFERENTES NUMEROLOGIAS



FONTE: FRAME (2019).

A numerologia também é responsável por identificar a quantidade de *slots* presentes em cada subframe. Para $\mu = 1$, cada *subframe* possui apenas um *slot*.

Porém, quanto maior o índice μ , mais subdivido em slots será o *subframe* (TABELA 2).

TABELA 2 – NÚMERO DE SLOTS DE ACORDO COM O ESQUEMA DE NUMEROLOGIA

Numerology	Subcarrier spacing	# slots per subframe	Slot length
0	15 kHz	1	$1\text{ms}/2^0 = 1\text{ ms}$
1	30 kHz	2	$1\text{ms}/2^1 = 500\text{us}$
2	60 kHz	4	$1\text{ms}/2^2 = 250\text{ us}$
3	120 kHz	8	$1\text{ms}/2^3 = 125\mu\text{s}$

FONTE: 5G FLEXIBLE (2019).

2.5.4 Outros parâmetros

Alguns outros parâmetros da rede são de extrema importância para o seu desempenho, sendo um deles o OFDM, já citado na Seção 2.5.3. Esta técnica possui algumas variações que podem ser implementadas no 5G, como o CP-OFDM, o W-OFDM e o F-OFDM. (STASIO, MONDIN e DANESHGARAN, 2018).

Outros elementos essenciais para a transmissão em redes 5G são a *Target Code Rate (TCR)*, responsável por informar a quantidade de redundância utilizada em relação aos dados, e o tipo de codificação, caracterizado como técnicas de correção de erro para evitar ou corrigir falhas nas transmissões de bits.

Com o intuito de oferecer correção de erros e retransmissão, outra técnica é utilizada nas transmissões 5G, denominada de *Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ)*. Para oferecer esses benefícios, esta técnica utiliza um método de correção de erro conhecido como “*soft combining*”, que visa não descartar o pacote com erro e sim armazená-lo em um *buffer* e combiná-lo com a sua retransmissão. (ARQ, 2019).

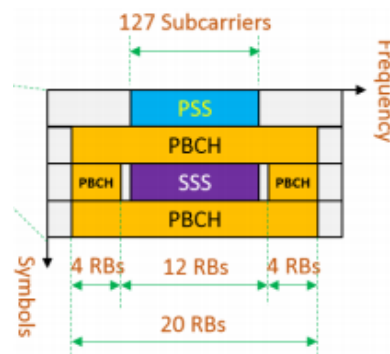
2.5.4.1 Estrutura de bloco

Todos os blocos da estrutura da rede 5G são alocados em função de blocos de recursos, o RB. Este elemento é definido em relação ao domínio da frequência e representa um conjunto de 12 subportadoras. Ele é responsável por definir diversos outros parâmetros, por exemplo a largura de banda e o *transport block size (TBS)*, o qual representa a quantidade de bits vinda da camada MAC para a camada física a cada intervalo de tempo de transmissão.

Como já mencionado, os blocos da rede também são compostos por RBs. Um deles é o *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH), bloco responsável por estabelecer um canal *downlink* para transmissões de dados e informações do sistema. O seu espaço ocupado no espectro é indicado pela quantidade de blocos de recurso alocados para o mesmo, sendo este um valor variável que depende das características da transmissão e dos dados em questão.

Outro bloco que compõe a estrutura do 5G é o *SS Burst*, um elemento de 20 ms de duração responsável por estabelecer a sincronização do sinal, transmitir informações básicas da conexão (largura de banda, elementos do processo HARQ, etc), entre outros. Cada *SS Burst* é composto por um ou mais *SS Block*, sub-bloco composto por um *Primary Synchronization Signal* (PSS), um *Secondary Synchronization Signal* (SSS) e um *Physical Broadcast Channel* (PBCH). Os dois primeiros sinais são responsáveis pela sincronização do *frame downlink* e pela determinação do *cell ID*. Já o PBCH possui a função de transmitir informações de largura de banda do canal, HARQ e outros bits do *frame*. O *SS Block* e a quantidade de blocos de recursos para cada elemento estão expostos na FIGURA 7.

FIGURA 7 – ESTRUTURA DO SS BLOCK



FONTE: LIN (2018).

3 A RELEASE 15

A proposta deste capítulo é, baseando-se no documento padronizador do 5G denominado como “*Release 15*”, evidenciar características importantes como faixas de frequência de operação, largura de banda e potência de transmissão e recepção. Pelo fato de a *release* ser muito extensa, serão expostos apenas os pontos principais da mesma e que mais fundamentam o trabalho em questão. Além dos valores padrão apresentados, diversas outras configurações são consideradas para todas as características da rede 5G, como por exemplo, a agregação de portadora (*carrier aggregation*) e *Proximity Services* (ProSe).

Além disso, uma breve apresentação da organização 3GPP será feita, com o intuito de melhor defini-la e mostrar a sua história.

3.1 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP)

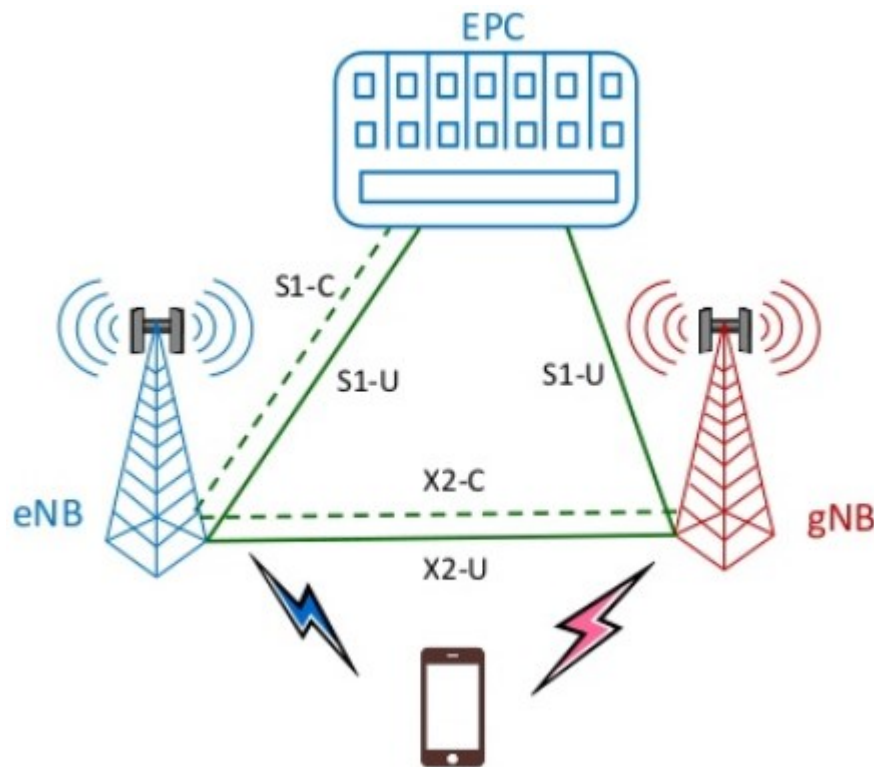
A 3GPP é uma organização tecnológica do ramo de telecomunicações responsável por desenvolver protocolos para telefonia móvel. Ela foi responsável pela criação e manutenção dos padrões do 2G/GSM, 2.5G/GPRS, 3G/UMTS, 4G/LTE e agora vem investindo seus esforços na rede 5G.

A organização teve seu início através de uma parceria entre as empresas *Nortel Networks* e *AT&T Wireless*, mas o propósito desta relação se tornou bem maior, desenvolvendo para uma escala global. A 3GPP atualmente é composta por associações de telecomunicações de diferentes países, sendo elas: *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB), *Alliance for Telecommunications Industry Solutions* (ATIS), *China Communications Standards Association* (CCSA), *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), *Telecommunications Standards Development Society* (TSDSI), *Telecommunications Technology Association* (TTA) e *Telecommunication Technology Committee* (TTC). Além disso, uma grande quantidade de empresas parceiras do ramo privado auxilia nas necessidades da organização, oferecendo incentivos financeiros, recursos para pesquisa e profissionais capacitados para contribuir no desenvolvimento dos novos padrões de redes móveis.

3.2 BANDAS DE OPERAÇÃO

A *Release 15* apresenta a primeira versão do 5G, que possui como previsão de funcionamento o ano de 2020. Devido a isso, as bandas de operação apresentadas são as mesmas do 4G, pelo fato da versão apresentada ser *non-standalone* (NSA), ou seja, uma rede que utilizará como base a estrutura do 4G/LTE para a sua operação. Com isso, é feita uma conexão de estruturas físicas para a interação 4G-5G, denominada como “E-UTRA NR *Dual Connectivity*” (EN-DC), exemplificada na FIGURA 8.

FIGURA 8 – VERSÃO NON-STANDALONE DA REDE 5G



FONTE: 5G NETWORK (2019).

Como se pode observar, o *Evolved Packet Core* (EPC) e a eNB, respectivamente representando o *framework* e a estação base do 4G, servem de estrutura base para o funcionamento da estação-base do 5G, denominada “gNB”.

Com isso, as bandas de operação fornecidas à nova rede móvel são apresentadas no documento 3GPP TS 36.101 V15.4.0 da *Release 15*, dispostas conforme a TABELA 3.

TABELA 3 – BANDAS DE OPERAÇÃO E-UTRA

Banda de operação	Banda de operação <i>uplink</i> (F _{LOW} – F _{HIGH})	Banda de operação <i>downlink</i> (F _{LOW} – F _{HIGH})
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz
6	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz
9	1749,9 MHz – 1784,9 MHz	1844,9 MHz – 1879,9 MHz
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz
11	1427,9 MHz – 1447,9 MHz	1475,9 MHz – 1495,9 MHz
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz
15	Reservado	Reservado
16	Reservado	Reservado
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz
18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz
19	830 MHz – 845 MHz	875 MHz – 890 MHz
20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

Nem todas as faixas de frequências foram mostradas para evitar um excesso de informação, pois são 85 bandas disponíveis, sendo a última delas composta entre 698 MHz e 716 MHz no *uplink* e entre 728 MHz e 746 MHz no *downlink*. Além disso, são evidenciadas outras características de espectro na *release*, como por exemplo as combinações possíveis de bandas e a separação entre as frequências de transmissão e recepção.

Como já comentado, pelo fato desta versão da rede 5G ser NSA, apenas as frequências utilizadas pelo 4G estão listadas. Porém, em futuras implementações outras faixas do espectro estarão disponíveis para uso, como por exemplo, as frequências das ondas milimétricas (30 até 300 GHz).

3.3 POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL

A potência de saída do dispositivo móvel, também conhecido como *user equipment* (UE), é apresentada em relação à classe de potência (*power class*) do mesmo. Este fator é dividido em 4 classes e cada uma delas atribui um valor mínimo de EIRP do sinal de saída do UE bem como um valor máximo de potência. Para fins de exemplificação, segue abaixo as características de potência da Classe 1 para diferentes bandas de operação, sendo elas as faixas n257 (26 GHz), n258 (24 GHz), n260 (39 GHz) e n261 (28 GHz) (TABELA 4).

TABELA 4 – EIRP MÍNIMA E POTÊNCIA MÁXIMA PARA A CLASSE 1

Banda de operação	Valor mínimo de EIRP (dBm)	Potência máxima (dBm)
n257	40	35
n258	40	35
n260	38	35
n261	40	35

FONTE: Adaptado de 5G NR (2019).

A TABELA 5 mostra as potências de saída máximas do UE de uma rede 5G, de acordo com a sua classe e a sua faixa de operação.

TABELA 5 – POTÊNCIAS DE SAÍDA MÁXIMAS DO DISPOSITIVO MÓVEL

Banda de operação	Classe 1 (dBm)	Classe 2 (dBm)	Classe 3 (dBm)	Classe 4 (dBm)
1			23	
2			23	
3	31		23	
4			23	
5			23	
6			23	
7			23	
8			23	
9			23	
10			23	
11			23	
12			23	
13			23	
14	31		23	
17			23	
18			23	
19			23	
20	31		23	
21			23	

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

A potência mínima para esta mesma situação também é fornecida pela *release*, sendo ela relacionada com a largura de banda do canal e a largura de banda realmente utilizada (TABELA 6).

TABELA 6 – POTÊNCIAS DE SAÍDA MÍNIMAS DO DISPOSITIVO MÓVEL

	Largura de banda / Potência de saída mínima / Banda efetivamente utilizada					
	1,4 MHz	3,0 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Potência de saída mínima	-40 dBm					
Banda efetivamente utilizada	1,08 MHz	2,7 MHz	4,5 MHz	9,0 MHz	13,5 MHz	18 MHz

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

3.4 POTÊNCIA DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL

Os valores apresentados no documento para a potência de recepção do UE são definidos como “nível de potência da sensibilidade de referência” (REFSENS), que corresponde à mínima potência média aplicada a cada uma das antenas do dispositivo móvel, com a condição da vazão do sistema ser pelo menos 95% do valor apresentado na *release* (mostrados nas próximas subseções).

Esta característica é indicada de acordo com a faixa de operação e largura de banda do canal, além de ser específica para transmissões que utilizam modulação QPSK (TABELA 7).

TABELA 7 – POTÊNCIAS MÍNIMAS DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL

Banda de operação	Largura de banda					
	1.4 MHz (dBm)	3 MHz (dBm)	5 MHz (dBm)	10 MHz (dBm)	15 MHz (dBm)	20 MHz (dBm)
1			-100	-97	-95.2	-94
2	-102.7	-99.7	-98	-95	-93.2	-92
3	-101.7	-98.7	-97	-94	-92.2	-91
4	-104.7	-101.7	-100	-97	-95.2	-94
5	-103.2	-100.2	-98	-95		
6			-100	-97		
7			-98	-95	-93.2	-92
8	-102.2	-99.2	-97	-94		
9			-99	-96	-94.2	-93
10			-100	-97	-95.2	-94
11			-100	-97		
12			-97	-94		
13			-97	-94		
14			-97	-94		
...						
17			-97	-94		
18			-100	-97	-95.2	
19			-100	-97	-95.2	
20			-97	-94	-91.2	-90
21			-100	-97	-95.2	
22			-97	-94	-92.2	-91
23	-104.7	-101.7	-100	-97	-95.2	-94

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

A potência máxima para esta mesma situação também é fornecida, obedecendo as mesmas condições de vazão do caso anterior e sendo indicada de acordo com a largura de banda do canal (TABELA 8).

TABELA 8 – POTÊNCIAS MÁXIMAS DE RECEPÇÃO DO DISPOSITIVO MÓVEL

Parâmetro de recepção	Unidade	Largura de banda					
		1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Potência máxima	dBm	-25					
		-27					
		-24					

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

Além da potência, outras características de recepção são informadas pela *release*, como por exemplo, a seletividade de canal adjacente (ACS). Este fator é uma medida da habilidade do receptor de reconhecer um sinal de uma determinada

frequência na presença de um sinal de canal adjacente de frequência próxima da outra fonte, podendo ser interpretado como um filtro de recepção no espectro.

3.5 VALORES DE REFERÊNCIA DE VAZÃO DA REDE 5G

Na *release* são apresentados conjuntos de diferentes valores de vazão da rede 5G, configurada de diversas formas, tanto em sentido *downlink* e *uplink*. Algumas dessas tabelas de resultados foram utilizadas como referência para a simulação realizada no presente trabalho, as quais serão apresentadas no próximo capítulo juntamente com a descrição do processo feito.

4 SIMULAÇÃO DE UMA TRANSMISSÃO DOWNLINK

Este capítulo tem como proposta detalhar a simulação realizada para analisar o desempenho da rede 5G padronizada pela *release* 15 desenvolvida pela 3GPP, destacando várias condições de simulação, os parâmetros utilizados, o tipo de canal, bem como todos os cenários e situações dos resultados gerados.

Por fim, será apresentada a adaptação de código criada para possibilitar uma análise da vazão do sistema em relação à variação da distância entre o UE e a estação base.

4.1 MODELAGEM DA SIMULAÇÃO

A simulação realizada da transmissão *downlink* de uma rede 5G segue os padrões estabelecidos pela *release* 15 da 3GPP e foi feita com base no código-exemplo "3GPP 5G NR PDSCH Throughput Simulation" do software MATLAB.

O cenário estabelecido para a simulação é a execução de uma transmissão de dados de uma estação base 5G (gNB) para um único UE, com duração de apenas 1 *frame* (10 ms). Os parâmetros comuns aos 3 cenários são apresentados na TABELA 9.

TABELA 9 – PARÂMETROS COMUNS AOS 3 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Valor
Forma de onda	CP-OFDM
Modo <i>duplex</i>	FDD
TCR	0.5
Frequência	2140 MHz
Prefixo cíclico	Normal
Tipo de codificação	LDPC
HARQ habilitado	Sim

FONTE: O autor (2019).

4.1.1 Canal

O canal representante do meio de propagação utilizado nos 3 cenários de simulação foi o padrão *Clustered Delay Line* (CDL), um modelo de canal definido pelo documento "3GPP TR 38.901". Este padrão é definido para transmissões de sinais de

frequências entre 0,5 GHz e 100 GHz com uma largura de banda máxima de 2 GHz. (3GPP TR 38.901, 2018).

O subtipo do padrão CDL escolhido para a realização do trabalho foi o CDL-C, o qual simula um meio de propagação de característica urbana de área extensa (UMa) e sem linha de visada direta. As antenas de transmissão e recepção também foram configuradas a partir dos parâmetros do CDL, através dos ângulos de azimuth e zênite de chegada e saída dispostos no documento de referência. Os valores de chegada e saída selecionados para os ângulos foram, respectivamente, 170° e $0,3^\circ$ para o azimuth e $75,3^\circ$ e $99,2^\circ$ para o zênite. Essa configuração fornece um ganho de 0 dB para o sinal ao percorrer o canal, conforme referência (3GPP TR 38.901, 2018, p. 67).

Outra característica definida pelo canal CDL é a distância entre os elementos da simulação. Ela é definida pela variável *correlation distance*, também apresentada na referência em questão. Para um cenário UMa e sem linha de visada direta, a distância assume o valor de 50 metros (3GPP TR 38.901, 2018, p. 47). Este valor é utilizado nos 3 cenários, porém no último deles há uma variação de distância.

4.2 PRIMEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Com o intuito de validar os resultados deste trabalho, primeiramente foi realizada uma simulação com os parâmetros de alguns modelos de transmissão apresentados na *release* 15, assim comparando os resultados gerados com os valores apresentados no documento.

As 3 configurações escolhidas para análise foram retiradas de um dos documentos da *release* (3GPP TS 36.101, 2018, p. 1452) e possuem os parâmetros apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – PARÂMETROS DAS CONFIGURAÇÕES DO PRIMEIRO CENÁRIO

Parâmetros			
Canal de referência	R.30	R.14-1	R.14-7
Largura de banda	20 MHz	10 MHz	15 MHz
<u>RBs</u> alocados	100	6	75
Modulação	16QAM	16QAM	16QAM

FONTE: Adaptado de 3GPP TS 36.101 (2018).

As 3 configurações (canais) selecionadas para a análise foram a R.30, R.14-1 e a R.14-7. A primeira delas (R.30) utiliza um esquema de antenas MIMO 2x2 e as outras duas utilizam um esquema de antenas MIMO 4x4. Todas elas adotam um espaçamento entre subportadoras de 15 KHz, além de obterem os parâmetros demonstrados pela tabela. A relação sinal-ruído do sistema é variável (-7 dB, 0 dB e 7 dB) para possibilitar a análise da relação desta característica com a vazão do sistema.

4.3 SEGUNDO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Após a validação do modelo de simulação realizado no primeiro cenário, foi possível estudar os impactos que alguns parâmetros causam na rede e na sua vazão. Para isso, diversas simulações foram realizadas com a variação de algum destes parâmetros, sendo eles a modulação, o espaçamento entre subportadoras, a largura de banda e o número de antenas.

Estabeleceu-se um padrão de transmissão para possibilitar uma comparação de resultados composto por uma largura de banda de 20 MHz, um esquema de antenas 2x2, um espaçamento de 15 KHz e a utilização da modulação 16QAM, sendo sempre um destes elementos escolhido como variável de estudo e assumindo diversos valores. As variações feitas a cada parâmetro citado são apresentadas na TABELA 11.

Outro ponto importante definido na rede é a quantidade de blocos de recurso reservados para dados, uma vez que esta característica é um dos parâmetros que determina a quantidade de bits transmitidos por *subframe*, influenciando no valor final da vazão. Definiu-se a quantidade de 32 RBs para todos os cenários, assim padronizando todos eles em relação a este fator.

Além disso, a relação sinal-ruído também foi variada (-6 dB, 0 dB e 6 dB) com o mesmo intuito no primeiro cenário, estabelecendo assim a relação entre a vazão e o parâmetro em questão.

TABELA 11 – VARIAÇÕES DOS PARÂMETROS

	Parâmetros			
	Largura de banda	Esquema MIMO	Modulação	Espaçamento entre subportadoras
Valores	10 MHz	2x2	QPSK	15 KHz
	15 MHz	4x4	16QAM	30 KHz
	20 MHz	8x8	64QAM	60 KHz

FONTE: O autor (2019).

4.4 TERCEIRO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Por fim, para avaliar o impacto da variação da distância entre o usuário e a estação-base, desenvolveu-se um código (APÊNDICE 1) baseado nas equações de perda de propagação do cenário UMa e sem linha de visada direta da referência (3GPP TR 38.901, 2018, p. 25). No código criado, a perda já determinada para 50 metros é subtraída pela perda para uma determinada distância (maior que a distância padrão), a qual é calculada pelas equações, resultando em um valor negativo. Este resultado é adicionado no campo de ganho do canal, que é predeterminado como 0 dB. Com isso, o canal acrescentará um ganho negativo no sinal transmitido de mesma amplitude da atenuação causada na distância escolhida.

A configuração de rede utilizada para esta análise foi um sistema com largura de banda de 20 MHz, modulação 16QAM, uma relação sinal-ruído fixa de 6 dB e 32 blocos de recurso alocados. Além disso, variou-se o espaçamento entre subportadoras em 15, 30 e 60 KHz e o esquema de antenas em 2x2, 4x4 e 8x8. O resultado da análise se deu em uma relação da vazão do sistema com a distância entre os elementos da rede, variada em 4 pontos (50, 75, 100 e 125 metros).

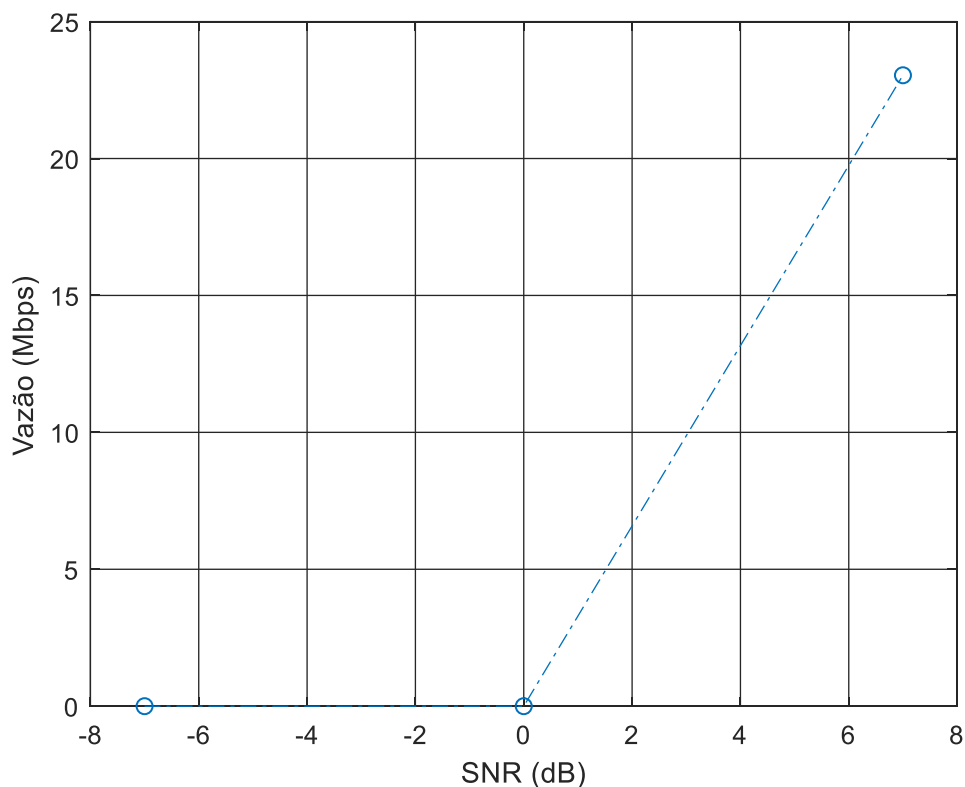
5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A proposta deste capítulo é apresentar os resultados das simulações dos três cenários estabelecidos, justificá-los e interpretá-los, gerando assim uma análise de desempenho da rede 5G, expondo a influência de cada parâmetro na mesma e analisando quais são as configurações mais propícias para a operação da rede estudada.

5.1 RESULTADOS DO PRIMEIRO CENÁRIO

O resultado da simulação do canal R.30 é ilustrado na FIGURA 9. Observa-se que foi obtida uma vazão muito próxima ao valor teórico (22,910 Mbps) apresentada na tabela 10 quando a relação sinal-ruído assume o valor de 7 dB (23,040 Mbps). Já para os demais casos, os valores de SNR são insuficientes, tornando a vazão do sistema nula.

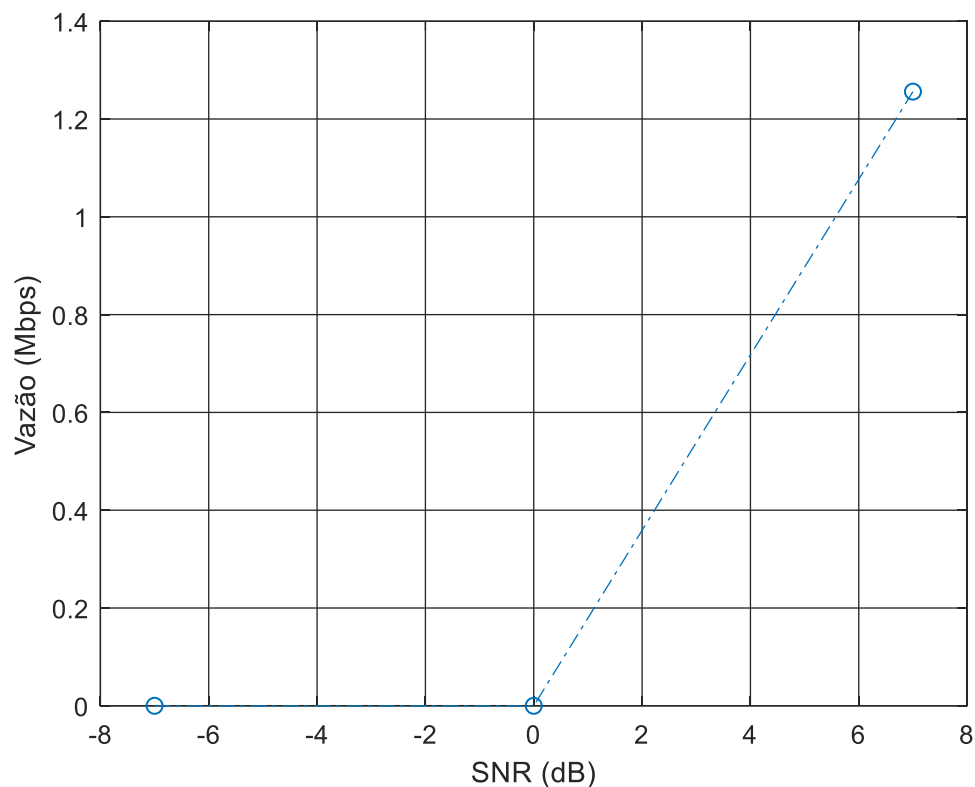
FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.30



FONTE: O autor (2019).

O próximo canal simulado foi o R.14-1, obtendo também um resultado bastante satisfatório quando a SNR assumiu o valor de 7 dB (FIGURA 10). Para este valor, obteve-se uma vazão de 1,256 Mbps, quase se igualando ao valor teórico de 1,235 Mbps. Para os outros valores de SNR, a vazão continuou nula.

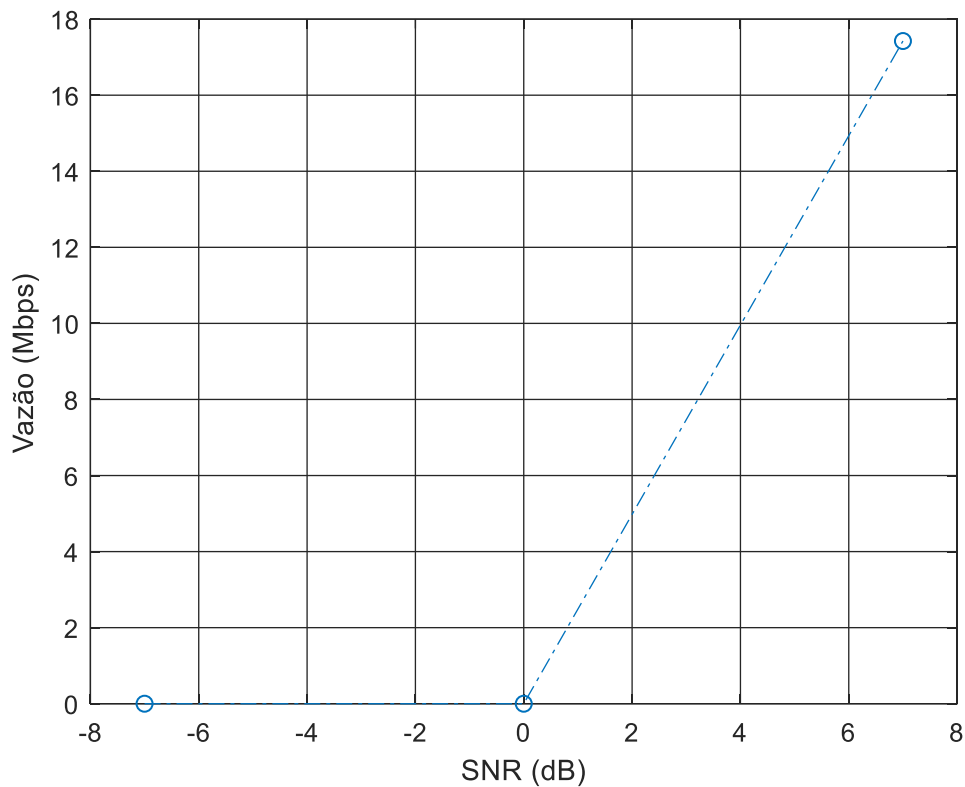
FIGURA 10 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.14-1



FONTE: O autor (2019).

Por fim, o canal R.14-7 foi simulado, obtendo uma situação bem semelhante aos testes anteriores (FIGURA 11). Para 7 dB, o valor de vazão simulado (17,424 Mbps) se aproximou do valor teórico (17,172 Mbps). E para -7 dB e 0 dB, a vazão se manteve nula.

FIGURA 11 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO CANAL R.14-7



FONTE: O autor (2019).

Com os resultados obtidos, percebe-se que o código utilizado para a realização do estudo se manteve fiel aos testes apresentados na *release* 15, o que contribui a validar os resultados mostrados nas subseções seguintes. Porém, observa-se uma grande dependência do valor da vazão com a SNR do sistema, mostrando que a conclusão só se torna válida a partir de uma determinada relação sinal-ruído (aproximadamente 7 dB em média), valor este obtido através de um teste de tentativa e erro.

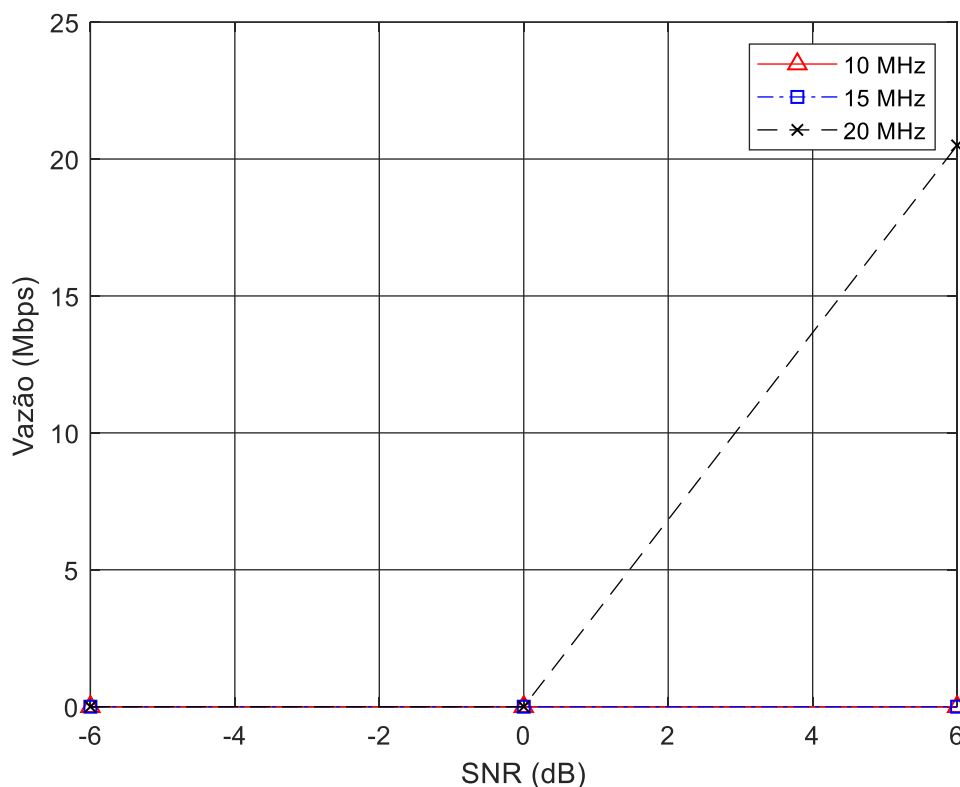
5.2 RESULTADOS DO SEGUNDO CENÁRIO

Ao variar os parâmetros já determinados, diversas curvas da relação entre a vazão e a SNR do sistema foram geradas. Com isso, para cada variação, foi possível estabelecer uma conclusão sobre as mudanças de resultados em cada situação, as quais estão descritas nas subseções a seguir.

5.2.1 Relação entre vazão e SNR com variação da largura de banda

A FIGURA 12 apresenta a relação entre a vazão e a SNR do sistema ao variar a sua largura de banda em 3 valores. Além disso, constata-se que a transmissão está configurada de acordo com a subseção 4.3.

FIGURA 12 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DA LARGURA DE BANDA



FONTE: O autor (2019).

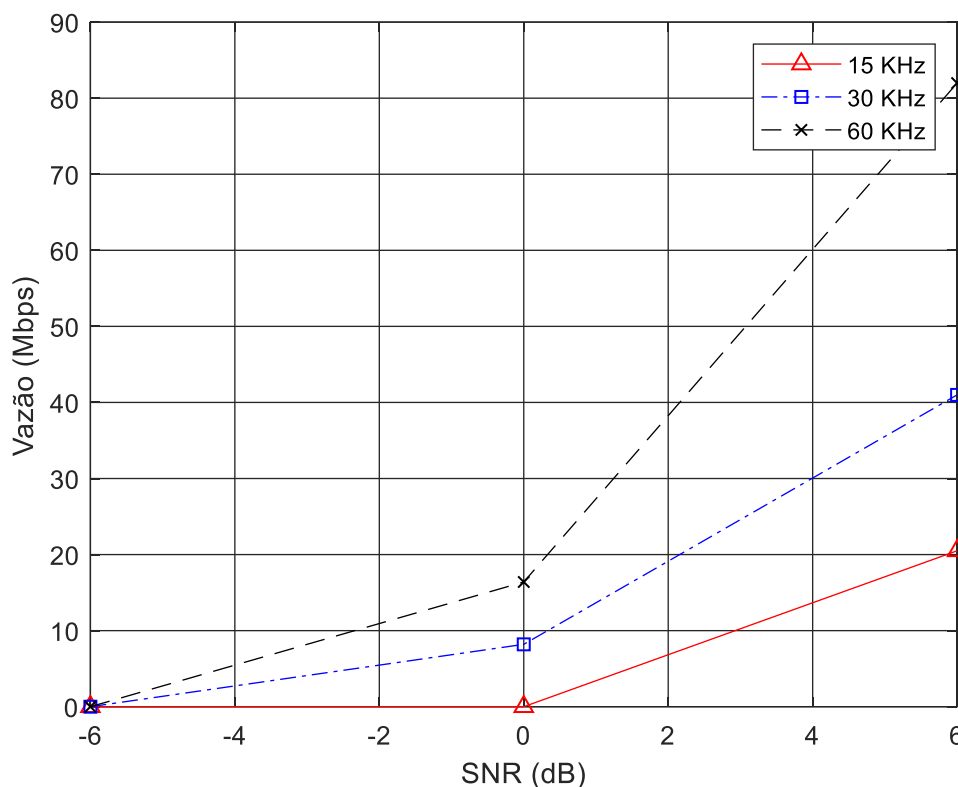
Percebe-se que, ao analisar os resultados, ao utilizar um canal de 10 MHz e 15 MHz a vazão se manteve nula para todos os valores de relação sinal-ruído pelo fato de a largura de banda não ser suficiente para transmitir os dados requisitados.

Já para 20 MHz, obteve-se um resultado diferente de zero. Para os dois primeiros valores de SNR a vazão se manteve nula, porém para 6 dB a vazão assumiu o valor de 20,496 Mbps. Logo, conclui-se que para este cenário, 20 MHz já é suficiente para a transmitir uma quantidade de *bits* considerável, porém só quando o sistema assume uma determinada SNR (6 dB, por exemplo).

5.2.2 Relação entre vazão e SNR com variação do espaçamento entre subportadoras

O efeito da variação do espaçamento entre subportadoras também foi analisado, executando as simulações com esse parâmetro assumindo 15 KHz, 30 KHz e, por fim, 60 KHz (FIGURA 13).

FIGURA 13 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS



FONTE: O autor (2019).

Observando o gráfico, percebe-se que a variação da vazão é muito considerável. Para o primeiro valor (15 KHz), o resultado obtido é idêntico à transmissão com 20 MHz da subseção anterior, uma vez que a configuração da rede é exatamente a mesma. Porém, quando o espaçamento assume o valor de 30 KHz, a vazão sofre um grande acréscimo. Este fator é justificado pelo fato da atuação do esquema de numerologia do 5G, uma vez que a mudança do tamanho do espaçamento é realizada pela mudança da numerologia utilizada. Para 30 KHz, o índice μ assume o valor 2, subdividindo o *frame* em 20 slots, como indicado na tabela

2. Com isso, o dobro de bits é transmitido em relação ao sistema de 15 KHz, uma vez que o *slot* transmite um valor fixo de informação.

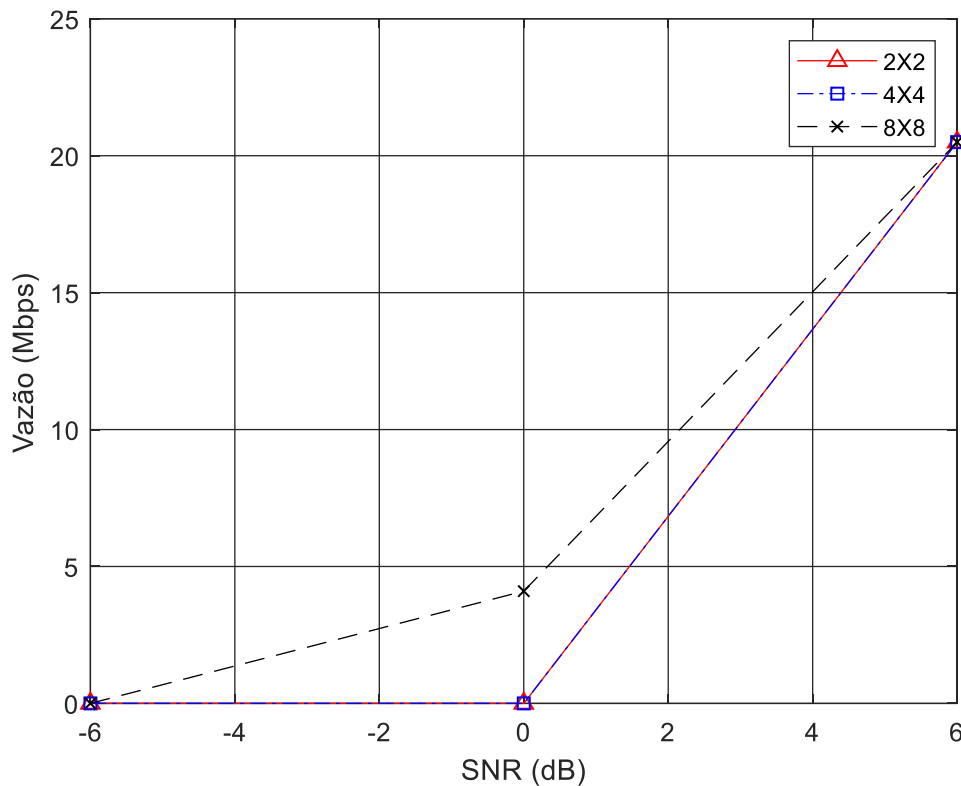
Além disso, para 30 KHz nota-se uma vazão de 8,198 Mbps para uma SNR de 0 dB. Uma eventual justificativa para a presença de vazão neste ponto é a menor sensibilidade do sinal ao ruído de fase, fator este causado devido ao aumento do espaçamento. (JEON, 2018). Nos outros pontos, a vazão continua nula para -6 dB e assume o valor de 40,992 Mbps para 6 dB.

Para 60 KHz, logicamente obteve-se vazões ainda maiores. Para este valor de espaçamento o índice μ assume o valor 3, fazendo com que sejam transmitidos 4 *slots* por *subframe* e consequentemente quatro vezes mais bits em relação ao sistema de 15 KHz. Para este caso, o aumento do espaçamento pode também ter causado uma menor sensibilidade do sinal transmitido ao ruído de fase.

5.2.3 Relação entre vazão e SNR com variação do número de antenas

O número de antenas de transmissão e recepção (MIMO) também foi variado a fim de analisar o impacto da alteração deste parâmetro na rede. Na simulação, os valores assumidos para esta variável foram 2, 4 e 8 (FIGURA 14).

FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA MIMO



FONTE: O autor (2019).

A configuração MIMO 2X2 gera vazão apenas em 6 dB, a qual indica o envio de todos os *bits* disponíveis para esta transmissão (20,496 Mbps).

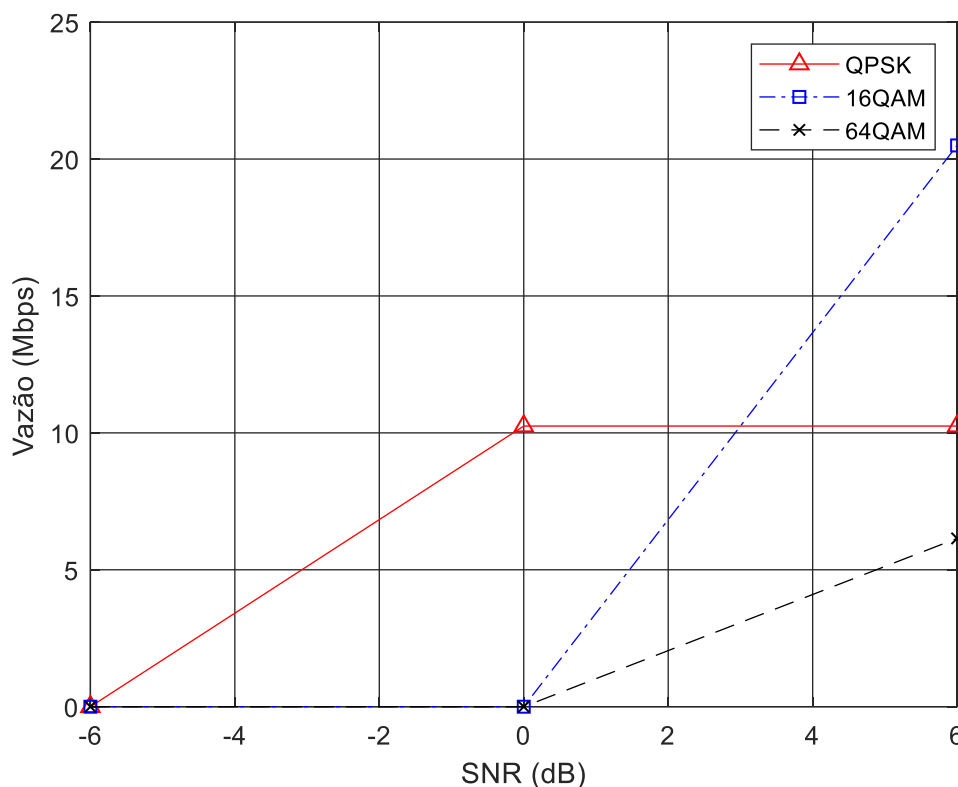
Quando o sistema é alterado para 4x4 os resultados não se alteraram, pois, o ganho oferecido pelo incremento de antenas não é suficiente para gerar uma vazão nas situações de baixa SNR. Já para uma relação sinal-ruído considerável (6 dB), não há como obter melhoras alterando apenas o esquema de antenas, uma vez que todos os *bits* disponíveis já foram transmitidos utilizando apenas um esquema 2x2.

Já para um esquema 8x8 os resultados se alteram pelo fato de a potência fornecida pelo aumento do número de antenas ser suficiente para possibilitar a transmissão de *bits* quando a SNR assume o valor de 0 dB. Porém, para -6 dB isto ainda não é possível, produzindo uma vazão nula para esta situação. Para a relação sinal-ruído máxima o valor se manteve o mesmo (20,496 Mbps) e para 0 dB a vazão foi de 4,099 Mbps.

5.2.4 Relação entre vazão e SNR com variação do esquema de modulação

Por fim, avaliou-se o impacto da variação do esquema de modulação na transmissão, sendo QPSK, 16QAM e 64QAM as técnicas escolhidas para a análise (FIGURA 15).

FIGURA 15 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E SNR DO SEGUNDO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA DE MODULAÇÃO



FONTE: O autor (2019).

Utilizando a técnica QPSK, a vazão foi nula para -6 dB e assumiu o valor de 10,248 Mbps para 0 dB e 6 dB. Ao alterar a modulação para a 16QAM, a configuração da rede se igualou ao padrão determinado na subseção 4.4. Comparando seus resultados com os anteriores, percebe-se que a vazão continuou nula no primeiro ponto de SNR, porém sofreu uma queda brusca para 0 dB, diminuindo seu valor de 10,248 para 0 Mbps. Este fenômeno pode ser justificado pelo aumento no número de constelações no 16QAM em relação ao QPSK (16 em relação a 4). Como no 16QAM o símbolo pode assumir 16 valores diferentes, são necessários 4 *bits* para o mesmo

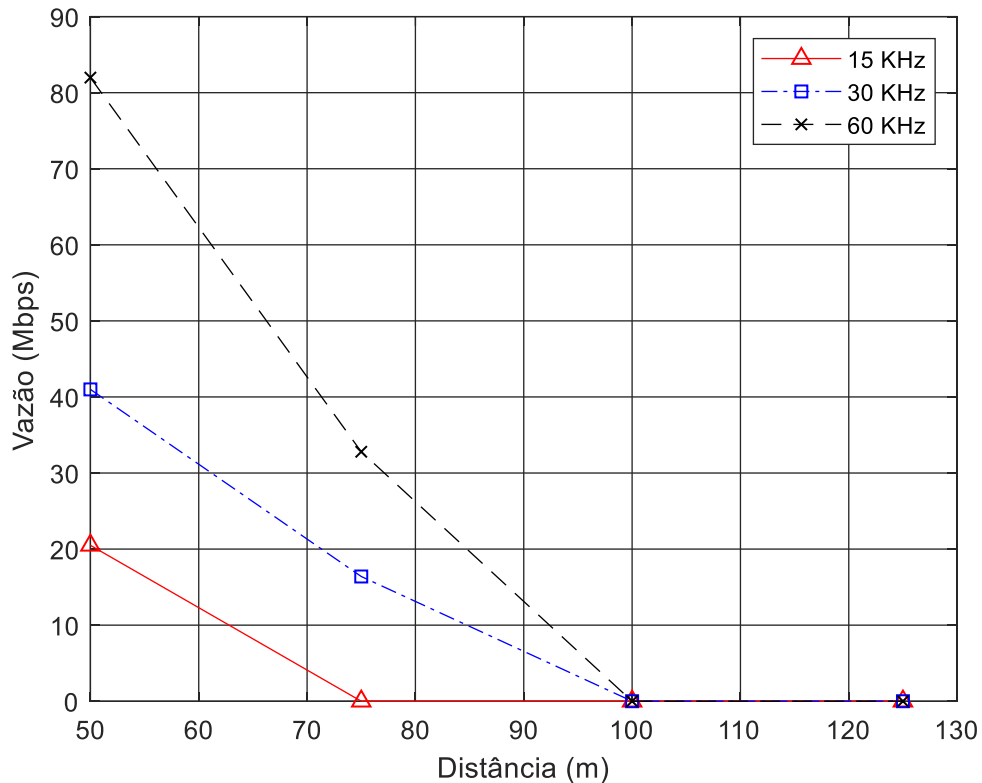
ser representado, o que aumentará muito a quantidade de *bits* (2 vezes mais) transmitidos, já que a quantidade de símbolos se manteve a mesma em todas as simulações. Geralmente este fator é positivo pois aumenta a vazão, porém quando não se possui uma relação sinal-ruído suficiente o aumento de complexidade da modulação se torna um ponto negativo, pois uma baixa SNR representa uma potência insuficiente para transmitir uma grande quantidade de informação. Já para 6 dB, a potência é suficiente e o 16QAM se torna um fator vantajoso ao sistema, dobrando a vazão à simulação anterior (20,496 Mbps).

Ao utilizar a modulação 64QAM a situação foi bastante semelhante nos 2 primeiros pontos. Para -6 dB e 0 dB a vazão foi nula pelo mesmo motivo de o sistema não possuir uma SNR suficiente para transmitir uma grande quantidade de *bits*. Já para 6 dB, a situação se alterou. Na configuração 64QAM, a quantidade de *bits* por símbolos é o triplo em relação ao QPSK, o que aumenta muito o tamanho da informação total transmitida. Entretanto, a potência oferecida por uma SNR de 6 dB ainda é muito baixa para transmitir toda esta informação, justificando a baixa vazão de 6,146 Mbps para este ponto.

5.3 RESULTADOS DO TERCEIRO CENÁRIO

A relação entre a vazão e a distância do sistema configurado de acordo com a subseção 4.4 e aplicando as variações de espaçamento entre subportadoras é mostrada na FIGURA 16.

FIGURA 16 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E DISTÂNCIA DO TERCEIRO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE SUBPORTADORAS

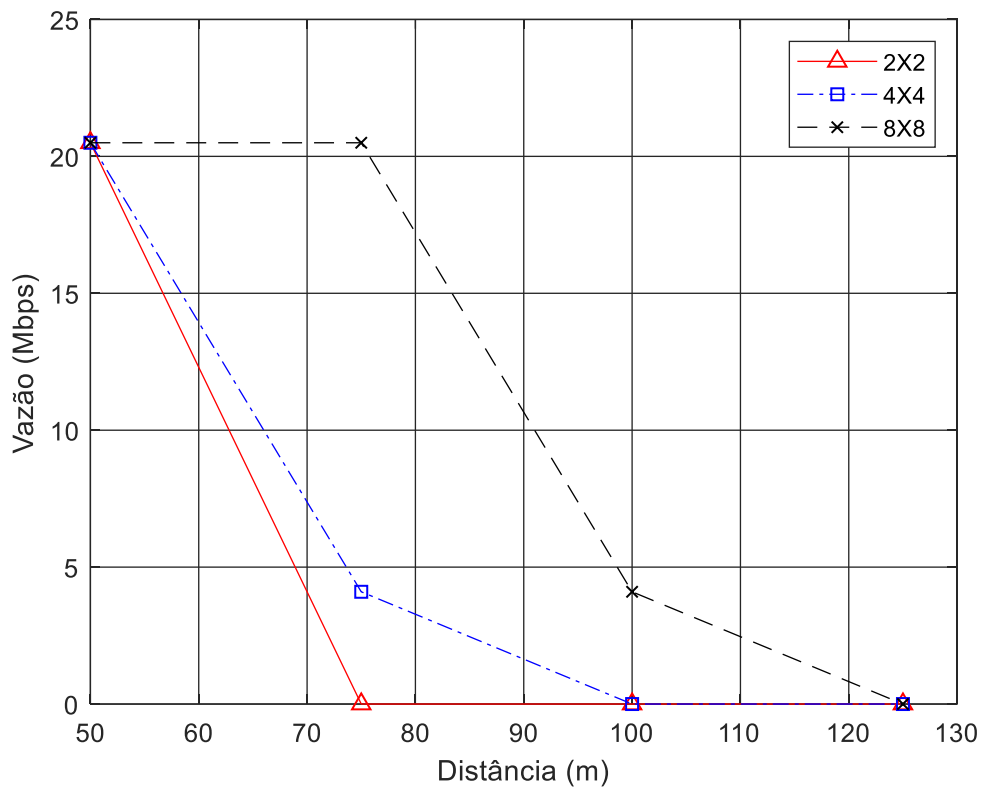


FONTE: O autor (2019).

Para um espaçamento de 15 KHz, observa-se uma vazão nula para todas as distâncias, exceto para 50 metros, na qual gerou-se uma vazão de 20,496 Mbps. Utilizando o espaçamento de 30 KHz, observa-se que há alguma vazão para a distância de 75 metros, além do primeiro ponto simulado. Para 50 metros, a vazão duplicou (40,992 Mbps) e para o segundo ponto obteve-se 16,397 Mbps. A eventual justificativa para esse aumento é a menor sensibilidade do sinal ao ruído de fase, fator este causado devido ao aumento do espaçamento entre as subportadoras (possibilitando a transmissão a distâncias maiores) e o acréscimo de *bits* transmitidos (o dobro) em razão da alteração do índice μ utilizado do esquema de numerologia. Ao alterar o espaçamento entre subportadoras para 60 KHz, as vazões nas 2 primeiras distâncias aumentaram devido aos mesmos motivos na configuração anterior, assumindo os valores de 81,984 e 32,794 Mbps. Já para 100 e 125 metros, a vazão continuou nula pelo fato de a potência não ser suficiente para estabelecer a transmissão.

A vazão em relação à distância também foi analisada considerando a variação do número de antenas, utilizando esquemas MIMO 2X2, 4X4 e 8X8 (FIGURA 17).

FIGURA 17 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E DISTÂNCIA DO TERCEIRO CENÁRIO COM VARIAÇÃO DO ESQUEMA MIMO



FONTE: O autor (2019).

Uma configuração com esquema MIMO 2X2 gerou uma vazão para uma distância de 50 metros (20,496 Mbps) e valores nulos para os outros pontos da simulação. Para a configuração com um MIMO 4x4, a vazão se manteve a mesma para 50 metros, pois este parâmetro já alcança seu valor máximo com um esquema de 2 antenas e não há um acréscimo de *bits* a serem transmitidos ao alterar este fator. Já para 75 metros, a transmissão foi possibilitada devido ao ganho de potência fornecido pelo incremento no número de antenas, gerando uma vazão de 4,099 Mbps. Para as 2 últimas distâncias, a potência ainda não foi suficiente para a operação no canal. Já para um esquema 8X8, a potência fornecida possibilita uma transmissão para 50, 75 e 100 metros, operando com uma vazão de 20,496 Mbps (valor máximo) nas 2 primeiras distâncias e 4,099 Mbps para a terceira.

5.4 CONCLUSÃO DOS RESULTADOS

Ao observar todos os resultados dos 3 cenários, percebe-se que a maior vazão obtida foi gerada pela configuração que utiliza um espaçamento entre subportadoras de 60 KHz com uma relação sinal-ruído de 6 dB, possuindo os outros parâmetros dispostos de acordo com o padrão apresentado na subseção 4.3. A vazão alcançada para este caso foi de 81,984 Mbps e, ao comparar este valor com o requisito deste parâmetro determinado pelo programa IMT-2020, percebe-se que o resultado não atinge nem 5% do demandado, uma vez que a vazão definida para a rede 5G pelo programa é de 20 Gbps, como demonstrado na figura 1. Com isso, observa-se que o modelo de rede padronizado pela *release* 15 ainda está longe de conseguir fornecer a vazão imposta pelos órgãos padronizadores do 5G. Porém, é previsível que este fenômeno ocorra, uma vez que a rede estudada ainda é *non-standalone* (NSA), ou seja, uma rede que utilizará como base a estrutura do 4G/LTE para a sua operação. Devido a esta característica, a sua qualidade de operação ainda será um pouco semelhante ao padrão de rede móvel anterior.

É importante dizer que esforços já vêm sendo realizados por parte de empresas e grupos de pesquisas para que a rede 5G continue em desenvolvimento e alcance os requisitos designados a ela, vide a *release* 16 que já foi iniciada pela organização 3GPP. O objetivo é definir padrões 5G cada vez mais distantes ao 4G/LTE, para futuramente estabelecer uma nova rede móvel que possui uma estrutura própria.

Outra característica importante a se notar após os resultados foi a dependência da operação da transmissão em relação às variáveis de SNR e largura de banda do canal. Notou-se que para várias configurações estabelecidas, necessitou-se que a relação sinal-ruído assumisse o valor de 6 dB para que a vazão do sistema não fosse nula. Em relação à largura de banda, percebeu-se que só utilizando um canal de 20 MHz foi possível que *bits* fossem transmitidos. Com isso, conclui-se que é necessário dar a devida importância a estes 2 parâmetros em futuras implementações do 5G, pois eles foram importantes para fornecer condições mínimas de operação da rede nos cenários de simulação avaliados.

Já os outros parâmetros serviram como “amplificadores” da qualidade de transmissão. Por exemplo, o espaçamento de largura de banda que, ao assumir 60 KHz, ofereceu uma vazão de 81,984 Mbps para 6 dB de SNR (a maior vazão obtida). Porém, com um espaçamento de 15 KHz (o menor valor assumido por esta variável),

o sistema ainda continuou em operação para uma mesma SNR, à 20,496 Mbps. Em relação ao acréscimo do número de antenas, notou-se que este fator se mostrou bem útil para situações de baixa SNR, uma vez que ele consegue evitar vazões nulas em algumas ocasiões (por exemplo, a vazão de 4,099 Mbps para 0 dB com um esquema MIMO 8X8). Além disso, este fator se mostrou bastante eficiente ao ser responsável por aumentar as distâncias máximas de transmissão, como exemplificado na figura 17. Quanto à modulação, observou-se que esquemas mais complexos necessitam de uma SNR mais alta que os valores utilizados para oferecerem aumento na quantidade de *bits* transmitidos. Este fenômeno pode ser exemplificado pelos resultados apresentados na figura 15, na qual é apresentada uma transmissão utilizando modulação 16QAM oferecendo uma vazão de 20,496 Mbps e uma transmissão utilizando modulação 64QAM oferecendo uma vazão de 6,146 Mbps para as mesmas condições.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao finalizar este trabalho, notou-se que a rede 5G testada obteve um funcionamento eficiente e de acordo com os valores encontrados na referência (3GPP TS 36.101). Porém, ao avaliar a vazão oferecida, percebe-se que os resultados gerados através das simulações não alcançaram nem 5% do valor demandado pelo programa IMT-2020. Com isso, é possível perceber que a primeira versão do 5G ainda não possui tantos avanços em relação ao 4G/LTE e, por isso, necessita de mais desenvolvimento para oferecer o serviço esperado do novo padrão de rede móvel.

Além disso, observou-se uma grande importância da largura de banda do canal e da relação sinal-ruído em relação ao estabelecimento da conexão, uma vez que, caso esses parâmetros não assumissem determinados valores mínimos, a transferência de *bits* não ocorria, gerando uma vazão nula. Já as outras variáveis do sistema (número de antenas, espaçamento entre subportadoras e esquema de modulação), mesmo assumindo valores “menores”, não impediram a transferência de dados.

Por fim, através do estudo via simulação de uma rede 5G, a pesquisa contribui sustentando ainda mais a sua implementação no futuro. E, ao evidenciar as limitações da rede, torna-se evidente a necessidade da implementação de novas tecnologias (por exemplo, as citadas na subseção 2.3) para que se possa alcançar os requisitos mínimos determinados para a mesma. Além disso, permite-se que o estudo gerado possa servir de base para melhoramentos na mesma e incentivar a realização de seus avanços e melhorias.

REFERÊNCIAS

3GPP. **TS 36.101: User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 15)**. 2018.

3GPP. **TS 38.321: Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 15)**. 2018.

3GPP. **TS 38.331: Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 15)**. 2018.

3GPP. **TS 38.901: Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 15)**. 2018.

3GPP TSG RAN WG1 Ad Hoc meeting for Channel Model, 2016, Ljubljana. **Channel model for link level evaluations**, Ljubljana, 2016.

5G FLEXIBLE Numerology – What is it?. Disponível em: <https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2018/09/07/5g_flexible_numerolo-XHto.html>. Acesso em 19 abr. 2019.

5G LATENCY – Reality Checks. Disponível em: <<http://www.senki.org/5g-latency-reality-checks/>>. Acesso em 26 mai. 2019.

5G NETWORK Architecture Options. Disponível em: <https://www.3g4g.co.uk/5G/5G_tech_video0018.html>. Acesso em 26 mar. 2019.

5G NR EU Power Classes. Disponível em: <<http://www.rfwireless-world.com/5G/5G-NR-UE-power-class-types.html>>. Acesso em 28 mar. 2019.

BAUM, D. S. et al. **Final Report on Link Level and System Level Channel Models**. IST-2003-507581 WINNER D5.4 v. 1.4, nov. 2005.

CAMPOS, J. **Understanding the 5G NR Physical Layer**. KEYSIGHT Technologies, 2017.

COMMUNICATIONS in wireless MIMO channels: Channels models, baseband algorithms, and system design. Disponível em: <http://www.telecomlab.oulu.fi/home/coursematerial/MIMO_1_intro.pdf>. Acesso em 20 mai. 2019.

FCC Spectrum Frontier Proposal. Disponível em: <<https://wireless.engineering.nyu.edu/fcc-spectrum-proposal/>>. Acesso em 20 mai. 2019.

FEI HU. **Opportunities in 5G Networks**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

FRAME Structure 5G/NR. Disponível em: <http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html>. Acesso em 06 abr. 2019.

GOZALVES, J.; COLL-PERALES, B. **Device-Centric Wireless Networks for 5G**. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche, 2017.

ITU-R. **Recommendation ITU-R M.2083-0**. 2015.

JÄMSÄ, T. et al. **Overview of WINNER Channel Modelling Activities**. Wireless World Research Forum, 2015.

JEON, Jeongho. **NR Wide Bandwidth Operations**. IEEE Communications Magazine, [S. l.], v. 56, n. 3, 2018.

KAMATH, H. S.; SINGH, H.; KHANNA, A. **Carrier Aggregation in LTE**. Department of Electronics & Communication, Manipal, 2016.

KEY Concept of 5G: Future Mobile Technology. Disponível em: <https://www.academia.edu/5729317/Key_Concept_of_5G_Future_Mobile_Technology>. Acesso em 04 abr. 2019.

KYOSTI, P. et al. **WINNER II channel models**. IST-4-027756 WINNER II D1.1.2 V1.2, sep. 2007.

LAB 5: 16 QAM Modulation. Disponível em: <<http://ecelabs.njit.edu/ece489v2/lab5.php>>. Acesso em 05 abr. 2019.

LIN, X. et al. **5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology**. Ericsson, 2018.

LTE: Conceitos de Transmissão e Recepção. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialintlte/pagina_3.asp>. Acesso em 05 abr. 2019.

MARQUES DE SÁ, J. P. **Processamento de sinal: Conceitos, Métodos e Aplicações**. Porto: J. P. Marques de Sá, 2001.

MATHWORKS. **Evaluating 5G Waveforms Over 3D Propagation Channels with the 5G Library**. 93107v00, mar. 2017.

NASA Ames Partners With M2MI For Small Satellite Development. Disponível em: <https://www.nasa.gov/home/hqnews/2008/apr/HQ_08107_Ames_nanosat.html>. Acesso em 04 abr. 2019.

O QUE é MIMO?. Disponível em: <<http://www.telecomhall.com/br/o-que-e-mimo.aspx>>. Acesso em 05 abr. 2019.

O que é Retransmissão, ARQ e HARQ. Disponível em: <<http://www.telecomhall.com/br/o-que-e-retransmissao-arq-e-harq.aspx>>. Acesso em 08 abr. 2019.

REDE wireless MIMO. Disponível em: <<http://www.wbrnet.com.br/2017/11/27/rede-wireless-mimo/>>. Acesso em 05 abr. 2019.

RODRIGUEZ, J. **Fundamentals of 5G mobile networks**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2015.

SHARMA, V.; JAIN, R. C. Multihop cellular networks: a review. **International Journal of Engineering Science and Technology**, vol. 2, 2010.

STASIO, F. D.; MONDIN, M.; DANESHGARAN, F. **Multirate 5G Downlink Performance Comparison for f-OFDM and w-OFDM Schemes with Different Numerologies**. DET Politecnico di Torino, Torino, jul. 2018.

TECNOLOGIA PLC I: Modulação. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialplcalt1/pagina_4.asp>. Acesso em 04 abr. 2019.

TV Digital II: Modos de Transmissão e Modulação. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtdconsis2/pagina_4.asp>. Acesso em 04 abr. 2019.

UNDERSTANDING Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation. Disponível em: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/>>. Acesso em 04 abr. 2019.

VANNITHAMBY, R.; TALWAR, S. **Towards 5G: Applications, Requirements and Candidate Technologies**. 1. ed. Chichester: Wiley, 2017.

VERIZON. **TS V5G.201: Physical layer; General description**. 2016.

APÊNDICE 1 – CÓDIGO DO CÁLCULO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO

```

%Cálculo da perda LOS para UMa
%Alturas em [m]
fc = 2140e6;
f_c = 2.14;
he = 1;
hbs = 25; %[altura do transmissor, em metros]
hut = 1.5; %[altura do UT, em metros]
d2d = simParameters.d2d;
h_bs = hbs - he;
h_ut = hut - he;
c = 3e08;
d_bp = (4*h_bs*h_ut*fc)/c;
d3d = sqrt((d2d(snrIdx))^2 + (hbs-hut)^2);
if 10 < d2d(snrIdx) <= d_bp
    pl_umalos = 28 + 22*log10(d3d) + 20*log10(f_c);
else
    pl_umalos = 28 + 40*log10(d3d) + 20*log10(f_c) -
        9*log10((d_bp)^2+(hbs-hut)^2);
end

%Cálculo da perda NLOS para UMa
pl_umanlos = 13.54 + 39.08*log10(d3d) + 20*log10(f_c) - 0.6*(hut-1.5);
plf(snrIdx) = max (pl_umanlos, pl_umalos);

%Ganho = perda NLOS UMa
channel.AveragePathGains = 88.237752268009970 - plf(snrIdx);

```